

# TRABAJO DE DIPLOMA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO.

Tema: Evaluación de las arcillas caoliníticas del depósito Cayo Guam para la producción de cemento de bajo carbono.

Autor: Yosvany Cruz Ramírez.

Tutores: Prof. Ing. Luis Alberto Pérez García  
Prof. Dr. C. Roger Samuel Almenares Reyes  
M. Sc. Pedro Luis Polanco Almaguer

Cotutor: Dr. C. Adrián Alujas Díaz

## Pensamiento



“[...] el ser humano, la sociedad humana se ve en la necesidad vital de marchar al mismo ritmo que avanzan los conocimientos técnicos, los conocimientos científicos; la sociedad humana siente una necesidad vital en ese sentido”

## **Dedicatoria**

A mi esposa, por su dedicación, sacrificio, amor y colaboración en los estudios.

A mi mamá, por ser ejemplo y la mejor madre del mundo, que por su dedicación, sacrificio y amor me he convertido en lo que soy.

A mi papá, por estar en cada momento de mi vida y apoyarme en las decisiones que siempre he tomado.

A mi suegra y mi suegro, por apoyarme en todo lo necesario durante mis años de estudios.

A toda mi familia.

## **Agradecimientos**

A todo el colectivo del grupo de Geotecnología de los Materiales:

- Angel Eduardo Espinosa Borges
- Liban García Obregón
- Carlos Herrera Sánchez
- Alfredo Hidalgo Suárez
- Armando Serrano Romero

Al colectivo de profesores de la facultad principalmente a:

A mis tutores de reajuste de plan de estudio y tesis:

Luis Alberto Pérez García, Marianela Crespo Lambert, Carlos Alberto Leyva Rodríguez y Andrés Salazar Moreno.

## **Resumen:**

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la influencia de las características químicas y mineralógicas de las arcillas caoliníticas del depósito Cayo Guam, para la producción de cemento de bajo carbono. Las muestras del depósito fueron caracterizadas química y mineralógicamente mediante técnicas de Difracción de Rayos X, Análisis Termogravimétricos, Fluorescencia de Rayos X. También se realizó la caracterización petrográfica de la roca madre con microscopía de luz polarizada. Se calcularon las pérdidas por ignición para determinar el contenido de caolín equivalente. Se realizó el análisis de la actividad puzolánica mediante el método de solubilidad de aluminio y silicio, y la correlación entre el contenido de caolín equivalente y la resistencia a la compresión mecánica. Los resultados de los análisis químicos mostraron altos contenidos de Fe, Si y Al, y baja concentración de Ca, Na, C y S, en el depósito. Se definió como paragénesis general, la constituida por caolinita, gibbsita, goethita, hematita, dickita, nontronita y nacrita. Se obtuvo un 86,2 % de caolín equivalente y un 12,3 % de pérdidas por ignición en los 750, 800 y 850 °C. El análisis de reactividad puzolánica demostró que la temperatura óptima para la disolución de fases ricas en Al y Si son los 800 °C. De acuerdo a la correlación entre el contenido de caolín equivalente y la resistencia a la compresión, se determinó que en todos los casos esta última supera los valores establecidos por NC (527 2013). Se estableció que el depósito de arcillas caoliníticas Cayo Guam tiene un alto potencial para la fabricación de cemento de bajo carbono.

## **Abstract**

The objective of this work is to evaluate the influence of the chemical and mineralogical characteristics of the kaolinitic clays of the Cayo Guam deposit, for the production of low carbon cement. The deposit samples were characterized chemically and mineralogically by X-ray diffraction techniques, thermogravimetric analysis, X-ray fluorescence. The petrographic characterization of the parent rock was also performed with polarized light microscopy. The ignition losses were calculated to determine the content of the equivalent kaolin. The analysis of the pozzolanic activity was carried out by means of the aluminum and silicon solubility method, and the correlation between the equivalent kaolin content and the compressive strength. The results of the chemical analyzes showed high contents of Fe, Si and Al, and low concentration of Ca, Na, C and S, in the deposit. It was defined as general paragenesis, that constituted by kaolinite, gibbsite, goethite, hematite, dickite, nontronite and nacrite. 86.2% of kaolin equivalent and 12.3% of losses by ignition were obtained at 750, 800 and 850 °C. The analysis of pozzolanic reactivity showed that the optimum temperature for the dissolution of phases rich in Al and Si are 800 °C. According to the correlation between the content of kaolin equivalent and the resistance to compression, it was determined that in all cases the latter exceeds the values established by NC (527 2013). The deposit of kaolinitic clays of Cayo Guam with high potential for the manufacture of low carbon cement is valued.

## Índice

Introducción:.....	10
Situación Problémica .....	11
Problema:.....	11
Objetivo General: .....	11
Hipótesis: .....	11
Objetivos específicos: .....	11
Objeto: .....	12
Campo de acción: .....	12
Marco Teórico Contextual .....	13
Proceso de producción de CPO.....	14
Producción de Cemento Portland Ordinario (CPO) en Cuba .....	16
Estrategias para disminuir las afectaciones al medio ambiente de la producción de cemento. ....	19
Los materiales cementantes suplementarios (MCS).....	22
Reacciones puzolánicas .....	23
CAPÍTULO I: CARACTERÍSTICAS FÍSICO - GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	26
1.1 Situación geográfica.....	26
1.2 Relieve. ....	27
1.3 Clima.....	28
1.4 Humedad relativa. ....	28
1.5 Red hidrográfica.....	29
1.6 Vegetación. ....	30
1.7 Fauna.....	31
1.8 Desarrollo económico de la región.....	31
1.9 Características geológicas regionales.....	31
1.10 Estratigrafía.....	32
1.11 Tectónica. ....	36
1.12 Geomorfología regional.....	38
1.13 Magmatismo.....	39
1.14 Materiales arcillosos de Cayo Guam.....	40

1.14.1 Situación geográfica: .....	40
1.14.2 Características generales del área de estudio: .....	40
CAPÍTULO II: MATERIALES, MÉTODOS Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.....	42
2.1 Etapas de la investigación. ....	42
2.1.1 Revisión bibliográfica (estado del arte): .....	42
2.2 Etapa de campo.....	53
2.2.1 Descripción de los itinerarios: .....	53
2.2.2 Puntos documentados. ....	54
2.3 Trabajo de laboratorio: .....	60
2.3.1 Preparación de las muestras. ....	60
2.3.2 Preparación para Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales. ....	61
2.3.3 Muestras para Fluorescencia de Rayos X y análisis de carbono azufre. ....	62
2.3.4 Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales. ....	63
2.3.5 Cálculo de Pérdidas por Ignición. ....	66
2.3.6 Análisis Térmico Diferencial y Termogravimétricos. ....	66
2.3.7 Determinación de $K^E$ .....	66
2.3.8 Determinación de alúmina y sílica disueltos en álcalis: .....	67
2.3.9 Determinar la resistencia a la compresión en morteros para una dosificación de PPC30 a partir del método de correlación de François Avet. ....	68
CAPITULO III: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	70
3.1 Resultados de la caracterización .....	70
3.1.1 Resultados del análisis químico.....	70
3.1.2 Resultados de la difracción de rayos X (DRX y DRXD) Cayo Guam (CG). .....	70
3.1.3 Resultados del análisis térmico diferencial. ....	72
3.1.4 Resultados del análisis petrográfico de la roca de basamento. ....	73
3.1.5 Cálculo del caolín equivalente y PPI.....	74
3.1.6 Resultados de la actividad puzolánica en la solución alcalina. ....	74
3.1.7 Resultados de la correlación de resistencia a la compresión según el contenido de caolín equivalente. ....	75



3.1.8 Resultados evaluación de las potencialidades del depósito arcillas caoliníticas de Cayo Guam como fuente de materiales cementante suplementarios. ....	77
Conclusiones:.....	79
Recomendaciones:.....	80
Referencias Bibliográficas:.....	81

## **Introducción:**

En tiempos en que el cemento se ubica como el segundo material más usado del planeta y su producción una de las más extendidas y nocivas al medio ambiente, una fórmula desarrollada por especialistas cubanos y suizos procura transformar esta dicotomía.

Según datos internacionales, la fabricación mundial de cemento supera las cuatro mil 400 millones de toneladas y es responsable de entre el cinco y ocho por ciento de las emisiones de carbono a la atmósfera, una realidad que pudiera cambiar con la introducción del LC3.

Estas son las siglas del Limestone Calcined Clay Cement (cemento de arcilla calcinada), una novedosa mezcla que tiene como novedad la sinergia entre la arcilla calcinada y caliza, lo que influye en la reducción de los volúmenes de clínquer, elemento más contaminante en las composiciones comunes. La reacción produce los carboaluminatos, que mejoran espectacularmente la resistencia del cemento.

La novedad del LC3 no solo radica en su potencial medioambiental, sino que además reduce los costos de producción por la factibilidad de los materiales y su resistencia puede compararse a la de cementos no mezclados como el Portland P-35 a pesar de tener un 50 % menos de clínquer. Solamente con unos 300 millones de toneladas de LC3 logramos reducir las emisiones de carbono globalmente en un uno por ciento (Cubadebate.cu 2018).

Para esto es necesario identificar los depósitos de arcillas caoliníticas en Cuba, realizarles un estudio detallado a estas y saber si cumplen con las condiciones requeridas para su explotación como recurso mineral imprescindible en la fabricación de este nuevo cemento.

Se ha dado la tarea de estudiar el área de Cayo Guam con el objetivo de evaluar, delimitar y analizar el depósito de arcillas caolinitas, con perspectivas para la fabricación de cemento de bajo carbono.

## **Situación Problemática**

Una de las limitantes para la generalización de este material cementante en Cuba, radica en la disponibilidad de materias primas para su producción. En ese sentido se reconoce que existen en Cuba diversos depósitos de arcillas caoliníticas que no han sido caracterizados para estos fines, aumentando la posible reserva. El primer y más importante paso antes de la diseminación del cemento de bajo carbono en el país es la caracterización de depósitos adecuados para la producción. Teniendo en cuenta lo anteriormente expresado, podemos arribar a la conclusión de que el depósito objeto de estudio de esta investigación, ha sido estudiado por diferentes autores y para diversos usos, y sin embargo hasta el día de hoy, no cuenta con un análisis detallado de la influencia de sus características químicas y mineralógicas de estas arcillas sobre las prestaciones del cemento de bajo carbono.

### **Problema:**

¿Qué relación existe entre las características químicas y mineralógicas de las arcillas del depósito Cayo Guam y las prestaciones del cemento de bajo carbono?

### **Objetivo General:**

Evaluar la influencia de las características químicas y mineralógicas de las arcillas caoliníticas del depósito Cayo Guam para la producción de cemento de bajo carbono.

### **Hipótesis:**

Si se caracteriza desde el punto de vista químico y mineralógico las arcillas del depósito de Cayo Guam, entonces se podrá evaluar su influencia sobre las prestaciones del cemento de bajo carbono.

### **Objetivos específicos:**

- Caracterizar química, mineralógica de las arcillas caoliníticas del depósito Cayo Guam.
- Caracterizar petrográficamente la roca madre que dio origen a las arcillas caoliníticas.

- Evaluar las pérdidas de masa por deshidroxilación y el cálculo de caolín equivalente.
- Determinar la influencia de la temperatura en la actividad puzolánica.
- Correlacionar la resistencia a la compresión y el contenido de caolinita equivalente.
- Valorar las potencialidades del depósito de arcillas caoliníticas de Cayo Guam.

**Objeto:**

Las arcillas caoliníticas de Cayo Guam.

**Campo de acción:**

Propiedades químicas, mineralógicas y tecnológicas de las arcillas de Cayo Guam.

## **Marco Teórico Contextual**

El proceso de obtención del cemento Portland se encuentra montado sobre la base de la explotación intensiva de recursos no renovables (materias primas y combustibles), y se emiten a través del mismo significativos volúmenes de gases de efecto invernadero, sobre todo en los procesos asociados a la producción de clínquer, el principal componente del CPO (Martirena Hernandez, 2004).

Para solucionar los problemas medioambientales asociados a la producción de CPO la industria del cemento ha definido como medidas fundamentales mejorar la eficiencia energética, el uso de desechos como combustibles fósiles y la reducción de la relación clínquer / cemento en el aglomerante (Castillo, 2010).

El proceso de producción de cemento demanda grandes cantidades de energía, básicamente en la combustión de las materias primas en el horno y en la molienda, para reducir hasta polvo el clínquer. Aunque el requerimiento mínimo teórico de energía del proceso es de  $1.75 \pm 0.1$  MJ por Kg. de cemento producido (Hendriks, Worrell y Jager 1998), se estima que la producción de 1 Kg. de clínquer requiere, de forma efectiva, entre 3.2 y 6 MJ de energía térmica, en dependencia del tipo de proceso utilizado.

La reducción de los consumos de clínquer para la producción de diversos y nuevos tipos de cemento, se ha convertido en la temática de mayor interés por parte de productores e investigadores (Castillo 2010). Sobre la base de esto se desarrolla intensamente las investigaciones de nuevas formulaciones de aglomerantes con altos volúmenes de sustitución de clínquer, buscando al mismo tiempo mantener o mejorar las prestaciones físico-mecánicas y la durabilidad (Schneider et al., 2011).

## Proceso de producción de CPO

El proceso de producción del cemento está compuesto de 4 etapas principales:

1. Extracción, preparación y molienda de las materias primas
2. Dosificación y homogenizado de la mezcla cruda
3. Cocción (obtención del clínquer)
4. Molienda del clínquer (obtención del cemento)

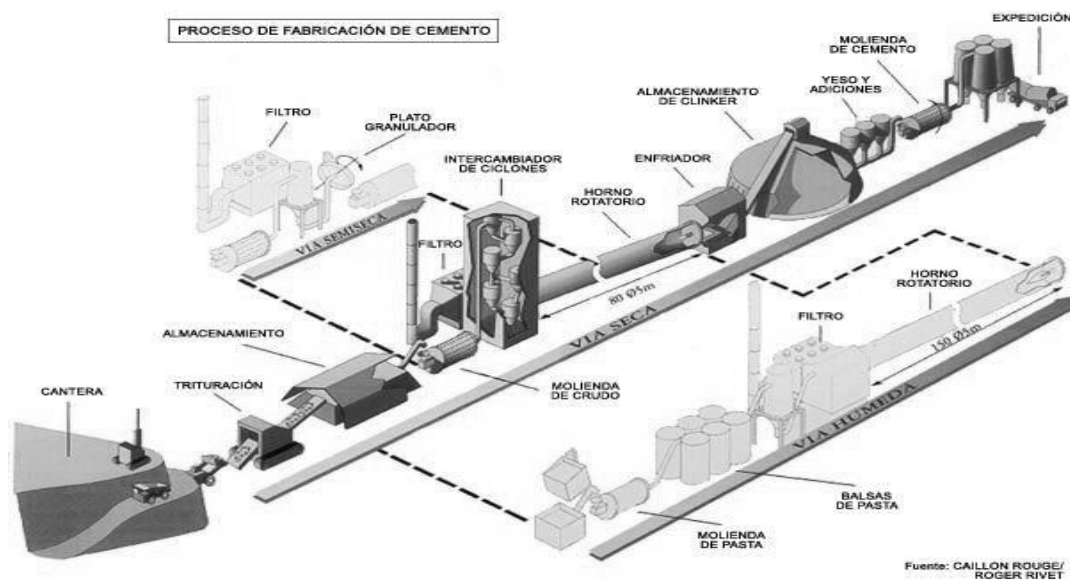


Figura 1: Proceso de fabricación del cemento Portland (Betancourt, 2012).

Inicialmente todo el proceso comienza con la extracción de las materias primas en la cantera, donde los minerales contienen óxido de calcio, óxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de hierro, etc. Posteriormente son transportadas a la planta donde son trituradas hasta 25 cm, seguido de una verificación de su composición química. A continuación, se realiza una segunda trituración hasta 2 mm aproximadamente, se analizan sus propiedades y se pre homogeniza la muestra.

Luego del procesamiento de las materias primas en función de sus características y del método de producción empleado (seco, semi-seco, húmedo), las mismas se someten a la cocción en un horno. La calcinación de la mezcla cruda obtenida tanto

por vía seca como por la húmeda, se realiza generalmente en hornos giratorios. Los hornos verticales se usan a veces sólo para el procedimiento seco. Los grandes hornos giratorios, de 150 – 250 m de longitud, se instalan con una cierta pendiente para posibilitar que el material vaya penetrando dentro del mismo, obligado además por su rotación, con una velocidad entre uno y dos revoluciones por minuto (Betancourt, 2012).

En los hornos giratorios, la mezcla de materias primas se suministra por la parte superior, que es la más fría, mientras que en la parte inferior se ubican los quemadores que pueden funcionar con distintos tipos de combustible, según el tipo (petróleo, carbón, petcoke, gas, etc.). Dichos quemadores producen una llama en forma de dardo con una longitud entre 15-30 m. La materia prima cruda, la cual se suministra en forma de polvo o de un lodo plástico (procedimiento seco y húmedo respectivamente), va sufriendo distintos procesos según se eleva la temperatura al transitar por las distintas secciones del horno.

#### **Dentro del horno existen seis etapas:**

1. La desecación hasta los 200 °C es donde las materias primas pierden la humedad.
2. El calentamiento de los 200 hasta los 700 °C provoca la quema de impurezas orgánicas.
3. La calcinación de los 700 hasta los 1100 °C los carbonatos se disocian y los minerales arcillosos se descomponen.
4. La formación de aluminatos y ferritos ocurre de los 1100 hasta los 1250 °C.
5. La formación del clínquer ocurre de los 1250 hasta los 1450 °C, a esta temperatura el silicato dicálcico (belita) y la cal reaccionan formando el silicato tricálcico (alita), el cual constituye el principal componente del clínquer.
6. El proceso de enfriamiento ocurre en dos etapas, primero antes de salir del horno (1300 hasta 1000 °C) se forma por completo la estructura del clínquer, donde la alita y la belita son sus minerales fundamentales; y la segunda etapa

al salir del horno (1000 hasta 200 °C) posterior a esto se enfría y se almacena durante 2 semanas aproximadamente.

Todo este proceso culmina con una molienda conjunta del clínquer, yeso y adiciones en equipos mecánicos que someten dicha mezcla a impactos metálicos o fuerzas de compresión elevadas, ya sea por prensas de rodillos, molinos verticales de rodillos, molinos de bolas o molinos horizontales de rodillos.

Luego de la molturación ya se obtiene el producto final, “el cemento”, el cual se despacha para su comercialización y uso, ya sea a granel, en sacos o en big bags (Betancourt, 2012).

Durante la elaboración del cemento, es la producción de clínquer la responsable de ser la de mayor consumo de energía y a su vez la de mayores emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Ello ha llevado a disminuir el contenido de clínquer a partir del empleo de materiales puzolánicos, cuya demanda se ha incrementado desde principios de la década de los 80, y se preveé que en un futuro cercano se incremente más aún.

### **Producción de Cemento Portland Ordinario (CPO) en Cuba**

La industria del cemento en Cuba comenzó a finales del siglo XIX cuando se inauguró en La Habana la primera fábrica de cemento gris tipo Portland de Iberoamérica, el 7 de julio de 1895. Esta planta tenía una capacidad de 20 t/día o sea 6 mil t/año (por vía seca), lo cual bastaba para abastecer la demanda nacional, se comercializaba con la marca “Cuba” (Batista, 2007). A principios del siglo XX comienza su producción la segunda fábrica de cemento en las cercanías del río Almendares, con una capacidad de unas 60 000 ton por año. Las producciones se realizaban con tecnologías aún muy rústicas y muy poco productivas, pero que podían abastecer la demanda nacional. Tras el triunfo de la Revolución el país invirtió 465 millones de pesos en la industria del cemento lo que multiplicó la capacidad de producción instalada en 5 veces más a la existente hasta 1959. (Martirena Hernandez, 2004).



A partir de la década de 1980 se comenzaron a utilizar las puzolanas como sustitutas parciales del clínquer del CPO en Cuba. Todo ello fue posible ya que en nuestro país existen numerosos yacimientos de rocas zeolitizadas y de vidrio volcánico diseminado en todo el territorio nacional los cuales generalmente muestran una elevada actividad puzolánica. Dichas puzolanas fueron utilizadas como adiciones para producir diferentes tipos de CPO, las cuales se conocen como PP-350, PP-250 y CA-160 (Rabilero, 1993).

En la década de 1990 con la caída del Campo Socialista nuestro país tuvo que centrarse en alternativas más económicas que la producción de cemento en grandes plantas. En este momento es que surge el llamado "Cemento Romano" el cual comenzó a producirse en Santiago de Cuba. Desde 1996 comenzó un período de recuperación para la industria del cemento Portland en Cuba debido al incremento de las inversiones nacionales en zonas estratégicas como el turismo y a la inserción de Cuba en el mercado caribeño.

La Figura 2 muestra cómo ha evolucionado la producción de cemento en Cuba entre 2002 y 2012 (ONEI 2012).

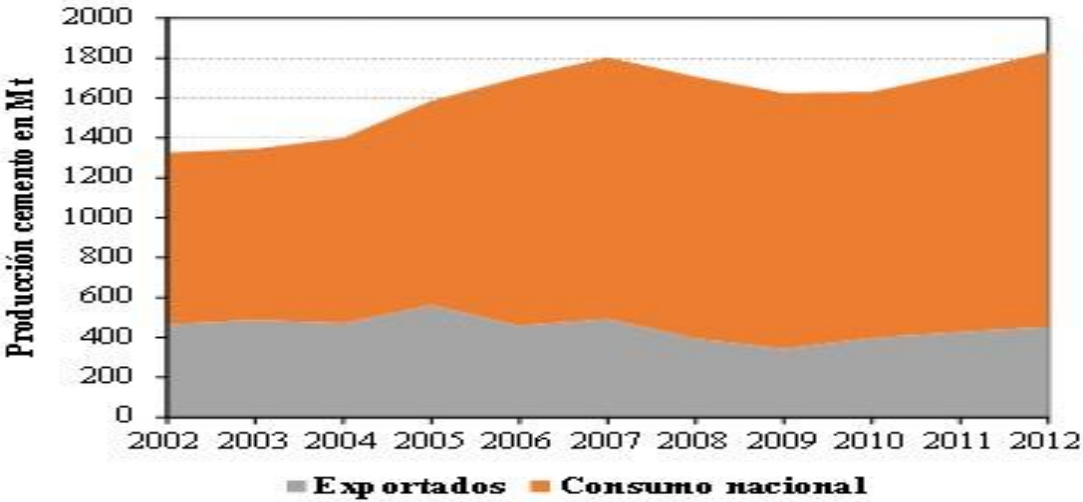


Figura 2: Producción de cemento en Cuba entre 2002 y 2012 (ONEI 2012).

Actualmente Cuba cuenta con 6 fábricas, con una capacidad disponible para producir **Cemento Gris** de 3,564 millones de toneladas anuales y **Cemento Blanco** de 0,08 millones de toneladas anuales, algunas por vía seca y otras por vía húmeda (Gallo, 2010). Estas fábricas están ubicadas en El Mariel y Artemisa provincia Artemisa, Guaos en Cienfuegos, Siguaney en Sancti Spíritus, Nuevitas en Camagüey y en Santiago de Cuba como se puede apreciar a continuación en la Figura 3.



Figura 3: Distribución de las fábricas de cemento en Cuba (Siverio Fernández 2016).

La Tabla 1 nos muestra las fábricas de cemento en operación en Cuba, sus tipos de procesos tecnológicos de producción y su producción en el año 2012 (Anuario Estadístico GECEM).

Tabla 1: Procesos tecnológicos de producción y producción de cemento de cada una de las fábricas en Cuba (GECEM, 2012).

Fábrica	Ubicación	Tipo de Proceso	Líneas de producción	Producción de cemento 2012 (Mt)	% respecto a la producción anual
<b>Mártires de Artemisa</b>	Artemisa	Vía húmeda	1 Gris	196.1	10.7
<b>René Arcay</b>	Mariel, Artemisa	Vía seca	2 Gris	624.2	34.2

<b>Karl Marx</b>	Guabairo, Cienfuegos	Vía seca	2 Gris	675.9	37.0
<b>Siguaney</b>	Siguaney, Sancti Spíritus	Vía húmeda	2 Gris 1 Blanco	128.4	7.0
<b>26 de Julio</b>	Nuevitas, Camagüey	Vía húmeda	2 Gris	104.5	5.7
<b>José Mercerón</b>	Santiago de Cuba	Vía húmeda	1 Gris	95.6	5.2
<b>Total</b>				1824.7	100 %

### **Estrategias para disminuir las afectaciones al medio ambiente de la producción de cemento.**

En la elaboración del cemento Portland, la producción de clínquer representa el mayor consumo de energía y es responsable también de los mayores volúmenes de emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que más del 50% del CO<sub>2</sub> liberado se debe a la descomposición de la caliza durante el proceso de fabricación del clínquer (Alujas, 2010). Se estima que por cada tonelada de cemento producida se emite entre 0.65 – 0.90 toneladas de CO<sub>2</sub> (Habert et al., 2010), lo que llevado a los datos de producción anual, sitúan a la industria del cemento como responsable de la emisión de entre 5 – 8 % del CO<sub>2</sub> a escala global (CSI 2010).

Según la *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)* para el 2050 habrá un incremento de la producción que alcanzará los 4400 millones de toneladas de cemento y otros pronósticos sitúan la demanda por encima de los 5000 millones. Este incremento elevará a su vez los niveles de emisiones de CO<sub>2</sub>, si se mantienen las condiciones de producción actuales (Vizcaíno, 2014). Debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> y las grandes cantidades de energía que demanda la fabricación de cemento que influyen significativamente en sus costos de producción y sostenibilidad ambiental se hace necesario poner en práctica estrategias que contribuyan al crecimiento de su producción de manera sustentable. Entre estas se encuentra la mejora en la eficiencia de los procesos, el uso de fuentes alternativas de combustibles y la reducción del factor de clínquer (Castillo, 2010).

Como se mencionó anteriormente una de las nuevas estrategias que se vienen desarrollando es la mejora en la eficiencia de los procesos de producción de cemento. Con la transición tecnológica del proceso húmedo al semi-húmedo, semi-seco o seco, se puede lograr una reducción considerable en los consumos energéticos requeridos durante la combustión de las materias primas. Se estima que los procesos húmedos consumen como promedio entre 5.3 – 7.1 GJ/t de clínquer y el proceso seco consume entre 3.2 – 3.5 GJ/t de clínquer. En el proceso de molienda también se han evidenciado algunas innovaciones como son el desarrollo e implementación de nuevos tipos de molinos como el de rodillos de alta presión y el de rodillos horizontales donde se emplea de un 20 – 50 % menos de energía eléctrica que con los tradicionales molinos de bolas (Vizcaíno, 2014).

Otra de las medidas que se han puesto en práctica en la industria del cemento es el uso de combustibles alternativos ya que más del 90 % de la energía usada en la producción de cemento procede originalmente de la quema de combustibles. La fuente energética más usada para la producción de cemento la constituye el carbón, que por su composición es muy contaminante, por lo que al reducir el contenido de carbón de los combustibles se logra reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Una práctica de ello es el empleo de gas natural, pero los precios de este último se han elevado de manera sostenida en el mercado internacional y no son competitivos con los precios del carbón, además de ser una fuente altamente demandada por otros sectores (CEMBUREAU, 2013). La utilización de productos de desecho provenientes de otras industrias como combustibles alternativos ofrece una gran oportunidad ante esta problemática. Estos pueden ser gaseosos como lo son el gas de refinería, los gases del proceso de craqueado del petróleo, pueden ser líquidos como los solventes libres de halógeno, aceites minerales o pueden ser sólidos como los residuos de la agricultura, neumáticos y plásticos. El uso de estos combustibles no solo es menos costoso, sino que puede reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de 0.1 – 0.5 toneladas por tonelada de cemento, comparado con los combustibles fósiles, además de contribuir al reciclaje de residuales industriales (Vizcaíno, 2014).

**La reducción del factor de clínquer** en el cemento a través del empleo de otros productos reactivos constituye una de las líneas de trabajo establecidas por la industria del cemento en su camino hacia la sostenibilidad ambiental. Del total de emisiones de CO<sub>2</sub>, aproximadamente el 40 % proviene de la quema de combustibles y el consumo de energía eléctrica, mientras que el 60 % restante es causado por la descarbonatación de las materias primas durante el proceso de fabricación del clínquer (CSI, 2010). Los materiales que se emplean como sustitutos del clínquer y que reaccionan con hidróxido de calcio son llamados comúnmente Materiales Cementicios Suplementarios (MCS).

El factor de reducción de clínquer es limitado por la reducción de la resistencia, sobre todo a edades tempranas y algunos MCS provocan un incremento en la demanda de agua, que tiene un efecto negativo en la reología. De acuerdo a las especificaciones de la ASTM C61803 para cenizas volantes y puzolanas naturales o artificiales y su empleo en hormigones, la composición química debe ser tal que la suma de los óxidos de Si, Al y Fe expresados como por ciento en masa, sea superior al 70% (Alujas, 2010). A pesar de los efectos mencionados anteriormente, el impacto que causa la utilización de estos materiales con respecto a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y la posibilidad de aumentar los volúmenes de producción de cemento sin grandes costos de inversión asociados, el empleo de MCS como sustitutos del clínquer en la producción de cementos mezclados constituye una de las mejores alternativas para contrarrestar el daño al medio ambiente en nuestro país (Martirena Hernandez, 2011).

El aumento de los niveles de sustitución de clínquer ha estado liderado por las regiones con economías emergentes, como Latinoamérica, India y China, que se encuentran por encima de la media mundial (Vizcaíno, 2014).

## **Los materiales cementantes suplementarios (MCS)**

Los materiales cementantes suplementarios (MCS) son aquellos materiales que, a través de su actividad de carácter hidráulico o puzolánico, contribuyen a mantener o incrementar las propiedades de los hormigones en su estado endurecido. Dentro del amplio grupo de MCS se encuentran las puzolanas, que se definen como; "aquellos materiales naturales o artificiales, ricos en sílice y alúmina, capaces de reaccionar con el hidróxido de calcio en presencia de agua para formar compuestos con propiedades cementantes" (Massazza, 1976). Las puzolanas se clasifican en dos grandes grupos: naturales y artificiales, aunque existe un grupo intermedio constituido por puzolanas naturales que necesitan tratamientos térmicos de activación. En este último grupo se encuentran los materiales arcillosos que permiten la formación de compuestos puzolánicamente activos en dependencia de su estructura, constitución mineralógica, composición química, temperatura y tiempo de cocción y de enfriado (Massazza, 1993).

A través de la combinación de las puzolanas y el cemento Portland, el hidróxido de calcio del sistema reacciona con los aluminosilicatos presentes en ella durante el proceso de hidratación, formando compuestos cementantes. El empleo de esta combinación se manifiesta a través de varias características fundamentales: el relativamente lento desarrollo de la resistencia mecánica, la disminución de la liberación del calor por masa de aglomerante, la disminución del contenido del hidróxido de calcio a través de la reacción puzolánica y el refinamiento de la estructura de poros, que trae consigo el incremento de la durabilidad y la resistencia mecánica. El lento desarrollo de la reacción puzolánica permite que los productos que se generan en la misma rellenen de forma muy eficiente los espacios capilares que quedan después de la hidratación de los componentes del cemento (Quintana, 2005).

La mayor parte de los materiales puzolánicos empleados lo constituyen las puzolanas de origen artificial: subproductos del sector industrial como las escorias de altos hornos (subproducto de la industria siderúrgica), las cenizas volantes

(subproducto de la quema del carbón en las plantas de generación eléctrica), y el humo de sílice (subproducto de la producción de silicio y ferrosilicio). Pero existe un grupo poco explotado, el cual posee abundantes reservas, como es el caso de las puzolanas naturales, la ceniza de la cáscara de arroz y las arcillas activadas térmicamente (Martirena Hernandez, 2004) y (Alujas, 2010), ver Figura 4.

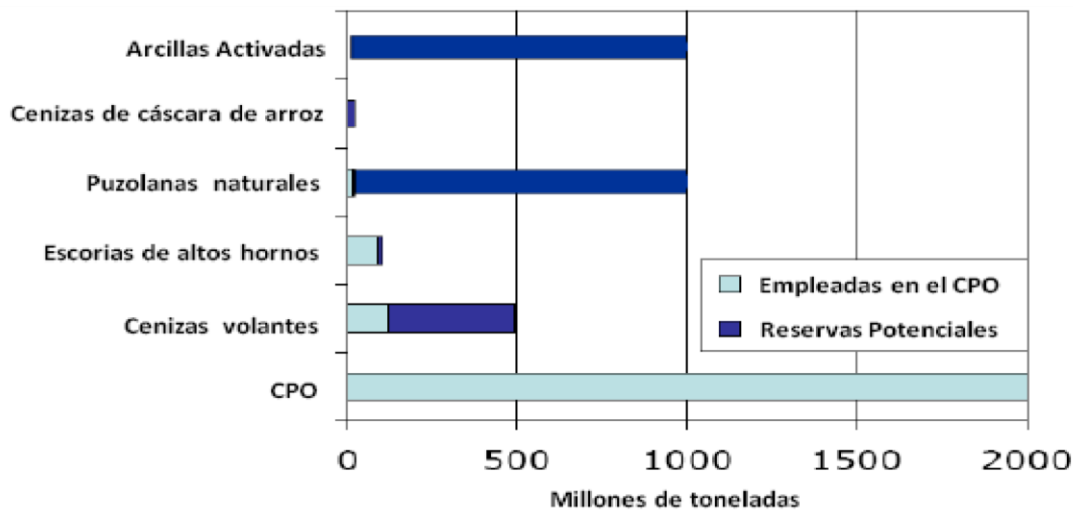


Figura 4: Empleo de materiales puzolánicos en la sustitución parcial del CPO (Scrivener, 2007).

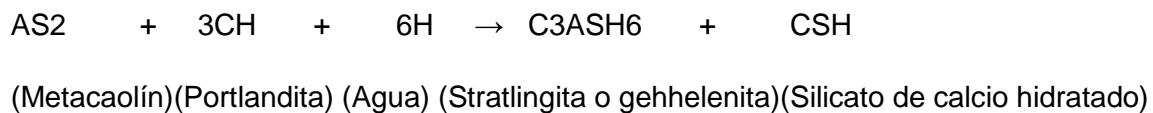
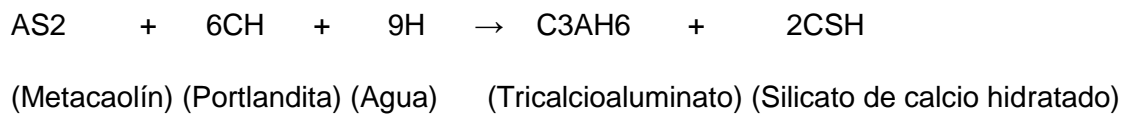
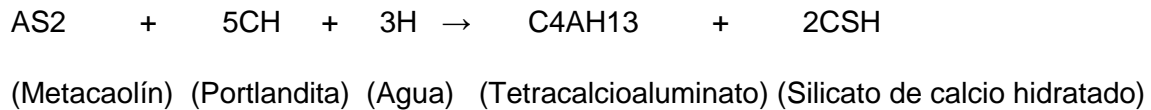
### Reacciones puzolánicas

Las reacciones puzolánicas, al igual que los procesos de hidratación del cemento, transcurren de acuerdo con las leyes cinéticas de las reacciones heterogéneas en estado sólido, con presencia de fenómenos difusivos y marcada influencia de factores de tipo interno y externo de las puzolanas. La reacción principal de cualquier material puzolánico es un ataque a las estructuras de silicatos o aluminosilicatos por parte de iones  $\text{OH}^-$ , para así formar productos similares a aquellos formados por la hidratación del cemento Portland.

La reactividad puzolánica de materiales provenientes de la activación térmica de las arcillas, dependen casi en su totalidad del tamaño de la partícula, el área de superficie específica y la mineralogía de las fases arcillosas. Si el material posee mayor superficie específica o finura provoca que aumente la velocidad de reacción cal-puzolana (Castillo, 2010).

A partir de la reacción de las puzolanas con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento se forman nuevos productos de hidratación que son los responsables de la mejora en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón (Alujas, 2010).

Durante la interacción entre el hidróxido de calcio, la sílice y la alúmina de las arcillas calcinadas, ocurren las siguientes reacciones:



Uno de los efectos físicos que ocurren producto de la adición de una puzolana al Cemento Portland Ordinario (CPO), es el aumento de la compacidad por efecto filler y la nucleación heterogénea por el aporte de las puzolanas de una superficie adicional, que favorece la nucleación y crecimiento a edades tempranas de los productos de hidratación del CPO. Estos efectos no dependen de la reactividad química de la adición mineral, sino de la cantidad de superficie disponible y del porcentaje de sustitución. Otro efecto es el de dilución, debido al cual se produce un mayor espacio para la formación y crecimiento de las fases hidratadas, lo que favorece la reacción de hidratación (Dopico, Martirena Hernández y Day, 2008).

La actividad puzolánica trae consigo un grupo de ventajas como son la disminución del contenido de cal libre en la mezcla para valores menores a un 30% de sustitución del CPO, proporciona un efecto acelerador en la hidratación de la fase alita del clínquer, acelera el tiempo de fraguado (inicial y final) de la mezcla, provoca un desplazamiento de los diámetros de poros hacia valores más pequeños



(refinamiento de la estructura de poros) que conlleva a la disminución de la permeabilidad y el aumento de la resistencia mecánica. Al mismo tiempo, como la portlandita presente en la pasta es susceptible a formar fases con potencial expansivo al reaccionar con agentes externos como los sulfatos, su reducción favorece la resistencia al ataque químico (Rodríguez, 2014).

# CAPÍTULO I: CARACTERÍSTICAS FÍSICO - GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.

## 1.1 Situación geográfica.

El área de estudio se encuentra enmarcada en la zona del municipio de Moa, el cual se ubica al noreste de la provincia de Holguín, limita al Este con el municipio Baracoa, separados por los ríos Jiguaní y Jaguaní; al Sur con el municipio de Yateras, cuya frontera la establece el origen del río Toa; al Oeste con los municipios Frank País y Sagua de Tánamo; y al Norte con el Océano Atlántico. El municipio posee una franja costera de unos 40 Km, que se extiende desde Playa La Vaca hasta la desembocadura del río Jiguaní. Próximos a la costa se encuentran Cayo Moa Grande, Cayo Chiquito y Cayo del Medio en la Bahía de Yamanigüey. La Región en estudio tiene un área de 732,18 Km<sup>2</sup>, la cual forma parte del grupo montañoso Sagua-Moa-Baracoa(Chacón, 2015), ver Figura 5.

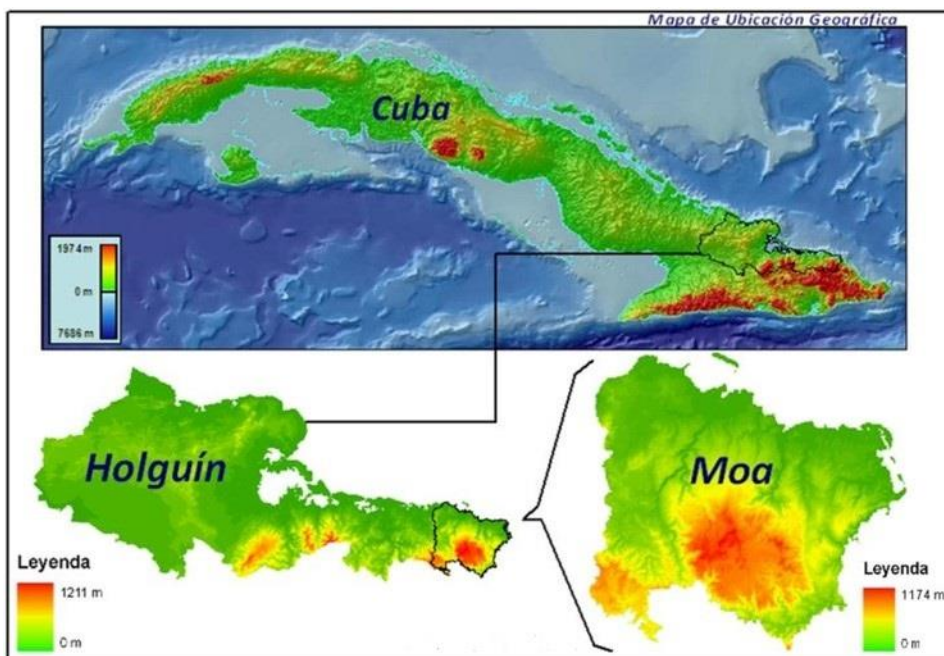


Figura 5: Esquema de ubicación geográfica (Viltres Milán, 2011).

## **1.2 Relieve.**

El relieve del territorio se caracteriza por una franja costera llana con alturas hasta de 200 metros, bastante estrecha y las altas montañas del sistema Sagua – Baracoa, que se extienden hacia el sur con alturas superiores a los mil metros, la mayor de las cuales es el Pico Toldo en las Cuchillas de Moa, con mil ciento setenta metros sobre el nivel del mar, ricas en recursos forestales y variados helechos.

La franja costera tiene una extensión de unos 40 kilómetros, llana y en ocasiones con ligeras alturas. Esa zona es seguida por un sistema premontañoso 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 Pedro Soto 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 km<sup>2</sup>, el 50 por ciento del total, la que 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(Chacón, 2015), ver Figura 6.

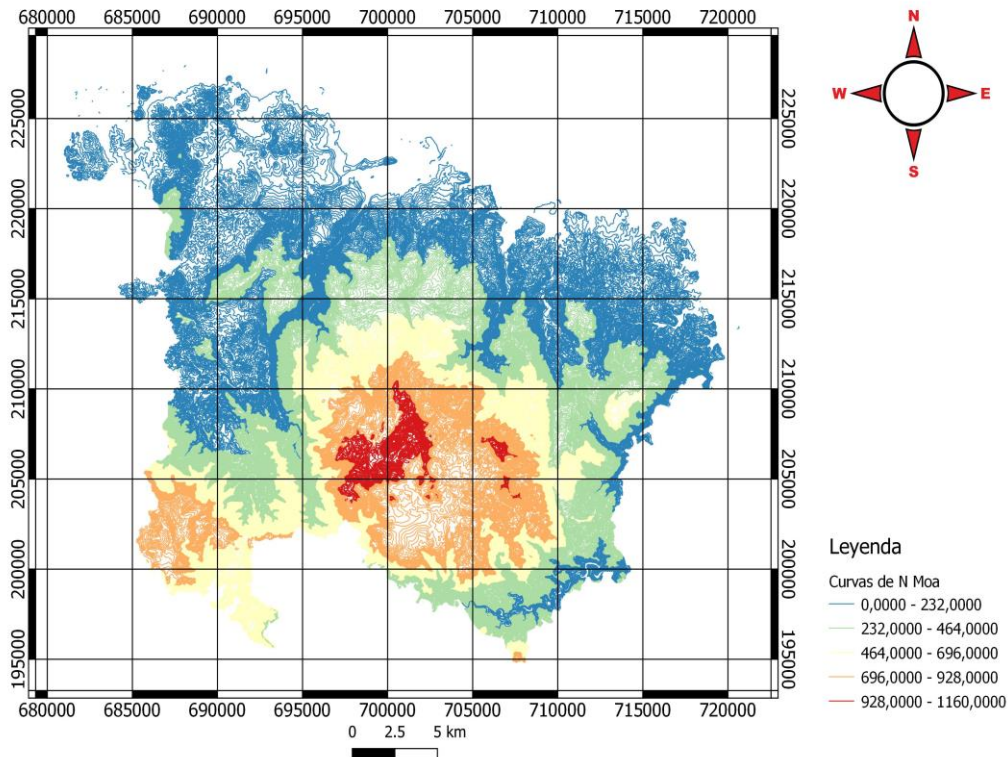


Figura 6: Mapa esquemático de curvas de nivel municipio de Moa escala: 1:100 000

### 1.3 Clima.

El clima es una de las razones a tener en cuenta, pues está influenciado por un sistema orográfico, en el que las barreras montañosas sirven de pantalla a los vientos alisios del NE, los cuales descargan copiosas lluvias. En general el clima en la región es tropical con abundantes precipitaciones que oscilan anualmente entre 1600-2200mm y la evaporación anual entre 2200-2400mm (Oliva, 1999) La temperatura media anual oscila entre 22.6 y 30.5 °C, siendo los meses más calurosos desde julio hasta septiembre, y los más fríos enero y febrero(Chacón, 2015).

### 1.4 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 de noviembre-abril, alcanzándose las máximas 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% (Chacón, 2015).

### **1.5 Red hidrográfica.**

En la región de estudio se desarrolla una red fluvial densa y dendrítica, representada por numerosos ríos y arroyos, entre los que se encuentran el río Moa, Cabañas, Yagrumaje, Cayo Guam, Quesigua, Cupey, Yamanigüey y Jiguaní, entre otros; todos ellos mantienen un buen caudal todo el año ya que su fuente de alimentación principal son las precipitaciones atmosféricas. 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 período de estiaje y hasta más de 300 m<sup>3</sup>/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, ver Figura 7.

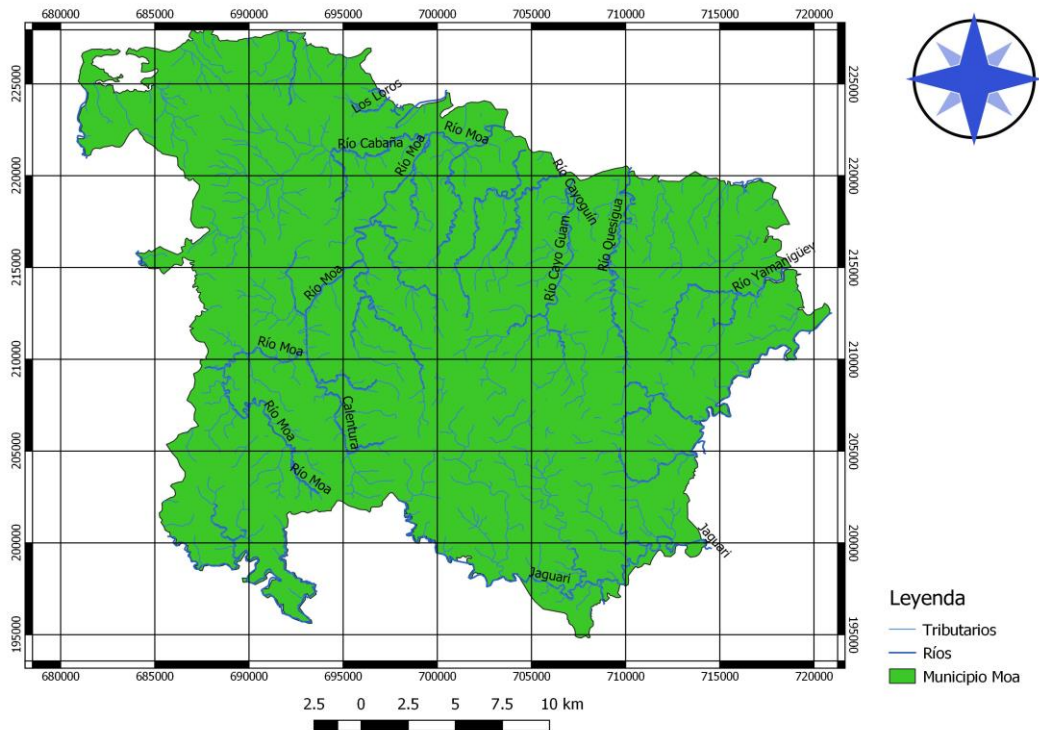


Figura 7: Esquema de la red hidrográfica de Moa escala 1: 100 000

### 1.6 Vegetación.

La vegetación comprende el 33% del endemismo cubano. Se puede encontrar pinares, pluvisilvas, charrasco y bosques tropicales predominando el pinuscubensis y plantas latifodias, esta es la más importante y explotada económicamente, además de ser valiosa en la biodiversidad y la ecología por construir una flora generadora del suelo. También se pueden observar ejemplares del bosque de pluvisilvas, típico de selvas lluviosas; es una formación vegetal de constitución vigorosa que puede alcanzar hasta 40m de altura, se implanta sobre cortezas lateríticas. También se desarrolla en laderas de arroyos y cañadas, una especie de camodaría latifolia, abundan los helechos en todas sus variantes, así como epifitas de orquídeas y bromeliáceas. Estos bosques retienen la erosión y favorecen la conservación de las fuentes de agua (Oliva, 1999).

### **1.7 Fauna.**

En ella encontramos 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.

### **1.8 Desarrollo económico de la región.**

La base económica fundamental de la región de Moa depende de la minería y la metalúrgica. 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. Además de estas industrias existen otras instalaciones de apoyo a la metalurgia y minería, tales como la empresa Mecánica del Níquel "Comandante Gustavo Machín", centro de proyectos del Níquel (CEPRONIQUEL), la Empresa Constructora y Reparadora del Níquel (ECRIN), el municipio cuenta además con un puerto y un aeropuerto, además existen otros centros industriales de menor tamaño, así como otros en construcción, vinculados a la actividad económica del territorio.

### **1.9 Características geológicas regionales.**

La estructura geológica del archipiélago cubano es extraordinariamente compleja y tiene características de faja móvil de carácter lineal. El rasgo principal de la constitución geológica de Cuba es la presencia de Asociaciones Estructuro Formacionales (AEF), que se distinguen por su estructura, composición facial e historia de su desarrollo que permite considerarlos como originados en diferentes condiciones paleotectónicas, lo cual constituye una nueva concepción acerca de la zonación estructural en Cuba.

La geología de la región se caracteriza por una gran complejidad condicionada por la variedad litológica presente y los distintos eventos tectónicos transcurridos

en un tiempo geológico dado, lo cual justifica los diferentes estudios y clasificaciones realizadas, ver Figura 8.

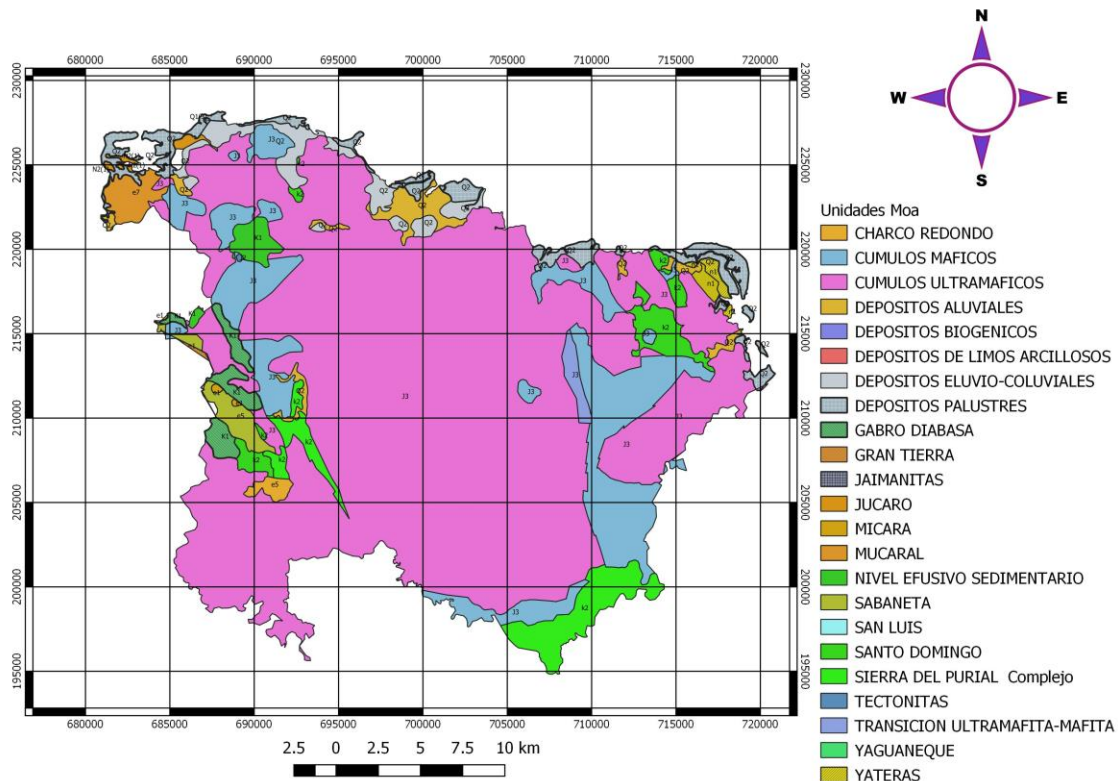


Figura 8: Mapa esquemático geológico del municipio Moa generado a partir del mapa del IGP escala 1: 100 000.

### 1.10 Estratigrafía.

En 1989, F. Quinta, en su tesis Doctoral, (1993), realizó la clasificación geológica regional según ocho asociaciones estructuro-formacionales. En la región aparecen cuatro, las cuales se mencionan a continuación:

1. (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 están 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 Fm las calizas pizarrosas bien estratificadas y muy plegadas de color grisáceo. Las tobas ocupan más del 50% de la Fm, apareciendo en la parte superior preferentemente, siendo comunes las variedades cristalovitroclásticas 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.

2. (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, conocido en la literatura como protusión. 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:

- Complejo Ultramáfico.
- Complejo Acumulativo Máfico.
- 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 plagioclásicas, wherlitas, lherzolitas 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., 2005) consideran que solo corresponden al manto la zona de tectonitas, puesto que las rocas del complejo acumulativo, 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 Acumulativo 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.

Complejo de Diques paralelos o Diabasas: no aparece como se define clásicamente en forma de diques, lo cual se debe a su relación con la complejidad tectónica de la región. Las diabasas aparecen generalmente en forma de bloques tectónicos incluido en los gabroides, sobre todo en la parte inferior del complejo acumulativo.

### 3. (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.

#### Formación Sabaneta.

Perteneciente a la AEF del Arco de Isla Volcánico del Paleógeno (Neoarco), 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.

### 4. (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 de Oligoceno superior hasta el Mioceno.

### **1.11 Tectónica.**

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 grabens 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 aloctona.

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:

- Noreste - Sureste.
- Noroeste - Sureste.
- Norte - Sur.

La tectónica disyuntiva es de igual complejidad, existe un sistema de mantos tectónicos cuyo rumbo coincide con la dirección general del plegamiento de las secuencias antiguas y con la cual se asocian fallas inversas de ángulos abruptos y grietas de cizallamiento:

- Sistema de fallas en dirección Oeste - Noreste, Este - Suroeste.
- Sistema de fallas en dirección Norte - Noroeste, Sur - Suroeste
- Sistema de fallas más jóvenes en dirección Este - Oeste.

Además, estos sistemas fundamentales afectan intensamente las rocas serpentinizadas, surgidas durante el emplazamiento que provocó la división en bloques y favoreció el desarrollo de la corteza de intemperismo (Rodríguez Infante, 1998), ver Figura 9.

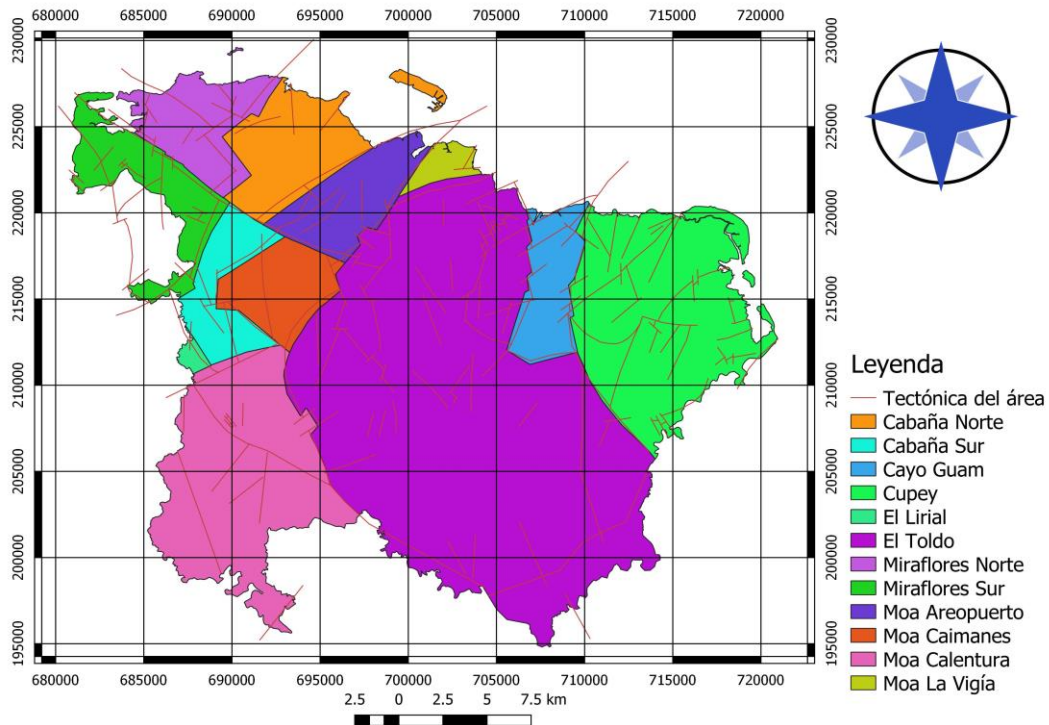


Figura 9: Mapa esquemático morfo-tectónico del territorio de Moa. escala 1: 100 000 modificado de (Rodríguez Infante, 2005)

## **1.12 Geomorfología regional.**

Debido a la existencia de condiciones geológicas contrastantes desde el Mesozoico, se reflejan de forma singular en el relieve de la región el accionar de complejos procesos geotectónicos. A estos se han superpuesto desplazamientos verticales, oscilatorios, diferenciados e interrumpidos, así como la separación en bloques del territorio.

El territorio se clasifica en dos zonas geomorfológicas fundamentales: la zona de relieve de llanuras y la zona de relieve de montañas, con subtipos específicos (Rodríguez Infante, 1998).

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. La formación de estas llanuras está relacionada con la acción conjunta de diferentes procesos morfogénicos que en ella han actuado, predominando los procesos fluviales y marinos.

Zona de Montañas. Esta zona geomorfológica es la más extendida dentro del área de las investigaciones ocupando toda la parte sur y central, además del Cerro de Miraflores y las zonas nordeste y noroeste del poblado de Cananova.

Teniendo en cuenta esos parámetros la zona de relieve de montaña fue clasificada en cuatro subtipos:

- Zona de premontañas aplanadas ligeramente diseccionadas.
- Zona de submontañas y premontañas ligeramente diseccionadas.
- Zona de montañas bajas aplanadas ligeramente diseccionadas.
- Zona de montañas bajas diseccionadas.

Conjuntamente con estas zonas geomorfológicas, aparecen en la región un conjunto de formas menores del relieve o elementos del paisaje que constituyen

elementos importantes en la caracterización geomorfológica regional, son criterios de evaluación tectónica y algunas representan un peligro para el medio ambiente.

Existen formas del relieve que han sido provocadas por la actividad antrópica, las cuales se citan a continuación:

Áreas minadas y escombreras. Con el crecimiento de la producción niquelífera se agigantan, constituyendo sectores descubiertos y desmembrados que aceleran el proceso de acarreamiento, intensifican el arrastre de los suelos con la consabida ruptura del equilibrio fluvial y provocan la acumulación anómala de sedimentos en las zonas bajas.

Presas de colas. Estas se multiplican en el paisaje moense y degradan progresivamente el medio físico.

### **1.13 Magmatismo.**

El magmatismo en la región está ampliamente desarrollado, siendo las rocas ultrabásicas el máximo exponente predominando las harzburgitas y de forma subordinada las dunitas, lherzolitas y piroxenitas con diferentes intensidades de serpentización todas ellas en su conjunto constituyen un enorme manto tectónico, generalmente en las proximidades de los contactos de las serpentinas 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, podemos plantear 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 (Chacón, 2015).

## 1.14 Materiales arcillosos de Cayo Guam.

### 1.14.1 Situación geográfica:

Depósito ubicado al sureste de la localidad de Moa, provincia de Holguín, específicamente en los márgenes del río Cayo Guam, a unos 2 km de la carretera Moa-Baracoa, a 200 m aproximadamente de la antigua planta de Beneficio de Cromo actual "Molino de piedras" perteneciente a la Empresa Constructora del Poder Popular (ECOPP), en torno a las coordenadas X: 700 000, 709 000 y Y: 206 000, 220 000 según el sistema de Lambert. El área de estudio comprende aproximadamente una extensión de más de 10 000 m<sup>2</sup> (Pérez García, 2015) ver Figura 10.

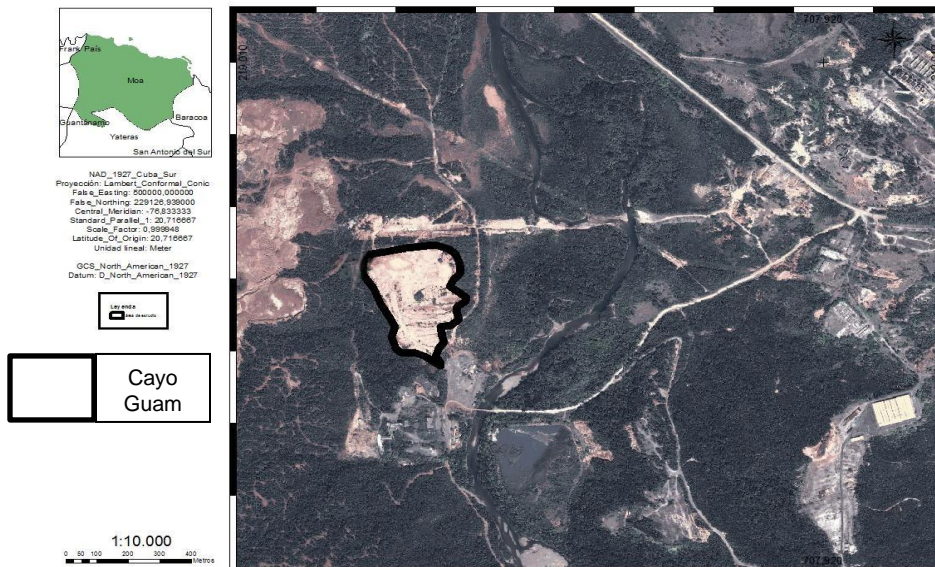


Figura 10: Esquema de ubicación geográfica del área de estudio. Escala 1: 10 000 (Pérez García, 2015)

### 1.14.2 Características generales del área de estudio:

El depósito tiene grandes taludes donde se pueden diferenciar sectores con variedad de tonalidades, estas pueden ser blanco- amarillentas, amarillo- pardo y otras, donde las rocas del basamento a partir de las que se originaron las potentes cortezas de intemperismo están representadas por cúmulos máficos y en menor grado cúmulos ultramáficos. Posee una potencia promedio de 10 m. Es un depósito desarrollado sobre gabros (corteza sobre gabros). Se considera un depósito



“residual” que es el tipo genético de las lateritas níquelíferas que están a su alrededor, diferenciados por la roca madre. En la base del depósito afloran gabros muy intemperizados alterados a un material de color blanco y aspecto terroso-arcillosos, muy deleznable y con alta plasticidad. Hacia la parte superior existe una transición gradual a materiales similares a los de la base del corte formando una corteza de meteorización de colores variables desde el rosado hasta el rojo intenso, a partir de análisis químicos se ha demostrado un incremento en el contenido de hierro y que durante el proceso de alteración hubo un aumento considerable de alúmina y la consecuente migración del Fe, Ca y Mg para la formación de la caolinita como mineral residual la cual tuvo su origen en la meteorización de cuerpos de gabros formando potentes capas que constituyen depósitos de gran extensión, (Orozco Melgar, 1995).

En la Figura 11: Esquema geológico de Cayo Guam generado a partir del mapa del IGP escala 1: 100 000.se puede observar la geología del área de estudio.

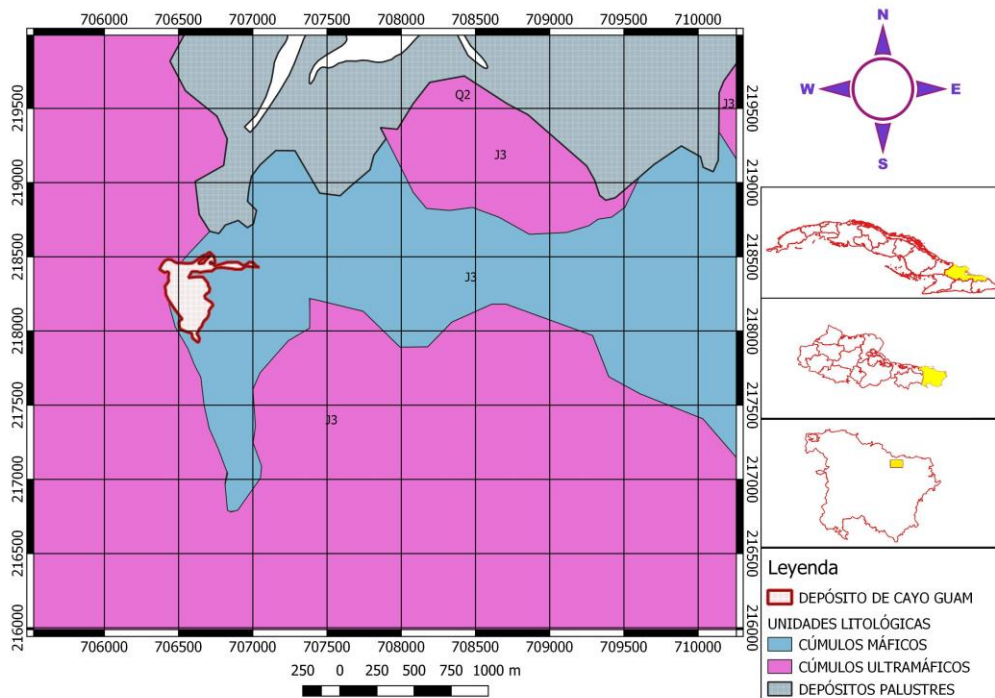


Figura 11: Esquema geológico de Cayo Guam generado a partir del mapa del IGP escala 1: 100 000.

## **CAPÍTULO II: MATERIALES, MÉTODOS Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.**

### **2.1 Etapas de la investigación.**

#### **2.1.1 Revisión bibliográfica (estado del arte):**

Según: Batista Rodríguez, (1998) en su trabajo titulado: “Características geológicas y estructurales de la región de Moa a partir de la interpretación del levantamiento aeromagnético 1:50 000”, en su investigación tenía como objetivo profundizar en las características geológicas y estructurales de la región de Moa. Utilizando la metodología de interpretación geólogo–geofísica y el levantamiento aeromagnético 1:50 000, el que utilizó como base para su investigación, donde se profundizó en las características geológicas y estructurales del área. Para esto se preparó inicialmente una base de datos digitales con toda la información disponible, la cual se procesó e interpretó de forma automatizada. La preparación de la base de datos incluyó la generación de una matriz de datos magnéticos a partir del mapa de  $\Delta T$  con la cual se realizaron las diferentes transformaciones del campo: reducción al polo, construcción de mapas de relieve sombreados, cálculos de gradientes horizontales, verticales y continuación analítica ascendente; las cuales fueron escogidas en función del objetivo propuesto en el trabajo.

Rodríguez Fernández, (2000) en la investigación titulada: Estudio petrológico de las rocas de afinidad ofiolítica portadoras de ilmenita en Cayo Grande, Macizo Moa-Baracoa, para esclarecer la geología y la metalogénia del complejo ofiolítico Moa Baracoa. Los estudios de química mineral de las rocas plutónicas de este macizo son muy escasos, reconoce dentro de las rocas plutónicas presentes en el macizo 4 niveles: a) peridotitas con texturas de tectonitas, b) la denominada zona de transición manto/corteza (Moho Transition Zone, MTZ), c) los gabros bandeados y d) los gabros isotrópicos.<sup>9</sup>

Rodríguez, Blanco Moreno, Proenza, & Orozco, (2001) en el artículo titulado La zona de Cayo Grande es parte del Macizo Moa-Baracoa, localizado en la parte más oriental de la faja Mayarí-Baracoa. En este trabajo se presentan y se discuten las características texturales, petrográficas, de quimismo mineral, de geotermometría catiónica, así como las implicaciones petrogenéticas de las rocas de afinidad ofiolítica presentes en la zona de Cayo Grande. Las características microestructurales en la zona de estudio, indican condiciones de desequilibrio entre el olivino y la asociación plagioclasa+clinopiroxeno, y no presentan correlación entre los contenidos de fosterita y los de Ni en los olivinos. Esto es indicativo de la existencia de circulación magmática mediante flujo poroso en la zona. El orden de cristalización de los clinopiroxenos anterior a la plagioclasa, y la composición de las plagioclasas en las gabronoritas estudiadas en la zona de Cayo Grande, son indicativos de secuencias de acumulados en ofiolitas de zonas de suprasubducción, lo que sugiere un ambiente geodinámico en una zona de expansión de una cuenca de trasarco para las gabronoritas de la zona de Cayo Grande.

Fadel Luali, (2005) en su trabajo de diploma determinó las propiedades mineralógicas de siete muestras de material arcilloso correspondientes a cuatro horizontes de la corteza de meteorización (CG-1; CG-2; CG-3 y CG-5), la cañada (CG-6), una de material intercalado entre los horizontes 2 y 3, (CG-4); y una goethita, desarrollada sobre gabros de zonas aledañas al río Cayo Guam del municipio de Moa, las cuales fueron caracterizadas mediante análisis de Rayos X, análisis químicos por el método de absorción atómica y determinaciones de índice de plasticidad por el método de Casagrande. Se realizó la separación granulométrica de estas muestras, obteniéndose tres fracciones +0,149; -0,149 +0,071; -0,071, a las que también se les realizaron análisis por difracción de rayos X, identificándose las fases minerales constituyentes de cada una de ellas.

Avila Méndez, (2010) en su trabajo “Caracterización mineralógica y tecnológica de materiales arcillosos del territorio de Moa para su empleo en la Industria Local”, muestra el estudio de los principales materiales arcillosos que se emplean en la tecnología de tratamiento de las arcillas de la región de Moa para la obtención de

mezclas cerámicas utilizadas en la producción de objetos cerámicos ornamentales y utilitarios. Mediante la metodología empleada se estudiaron cuatro mezclas cerámicas con diferentes dosificaciones de arcilla roja y pardo-amarillenta y caolinita, en las mismas proporciones utilizadas tradicionalmente en el Tejar de Centeno, a las cuales se les añadió determinadas cantidades de tobas vitroclásticas para obtener mejores resultados en cuanto al peso final de la muestra obtenida, valorando mediante ensayos sencillos, los siguientes parámetros tecnológicos: % de contracción, % de absorción de agua y resistencia a la compresión y el comportamiento de cada una de las mezclas durante el secado y la cocción. Se estudió además el comportamiento de las mismas respecto a la temperatura de cocción y al tamaño de partículas. Además se estudiaron, mediante el Espectrofotómetro Infrarrojo WQF-510 FTIR, las curvas de absorción, determinándose las características de los materiales arcillosos de diferentes zonas de la región de Moa.

Cisnero Palacio, (2010) en el trabajo titulado “Caracterización geoquímica de las cortezas de meteorización alíticas en Cuba Oriental: Zonas de Moa–Ságua de Tánamo,” tuvo como objetivo caracterizar desde el punto de vista geoquímico las cortezas de meteorización ricas en aluminio, sin o con pocos contenidos de níquel en las áreas de estudio y proponer sus posibles usos en vía del desarrollo de la economía nacional de forma rápida y eficiente. En Cuba Oriental existen grandes depósitos de cortezas de meteorización de diversos tipos. La mayoría de las investigaciones han sido dedicadas a las lateritas niquelíferas en Cuba Oriental debido a su gran aporte económico al país. Sin embargo, otros tipos de cortezas de meteorización han recibido un grado de estudio relativamente bajo. En este trabajo se presenta una caracterización geoquímica basada en los análisis químicos, recomendando un seguimiento de su estudio a gran escala, además de analizar sus posibles usos para el beneficio local y nacional. Sobre la base de un conjunto de métodos, partiendo de una revisión bibliográfica detallada y de la puesta en práctica de la metodología para la realización de este trabajo se llegó a importantes conclusiones sobre los posibles usos de las cortezas en cuestión y sus recursos

asociados, como en las industrias de cerámica, materiales de construcción, entre otros. Las muestras tomadas en los sectores del área de estudio, 23 en total, se analizaron por Fluorescencia de Rayos X y los resultados se procesaron con los programas Grapher 4, Microsoft Excel y Surfer 8. En las áreas de Baconal, El Culebro, Caimanes, Farallones y Cayo Guam las cortezas se desarrollaron a partir de rocas volcánicas y vulcanógeno-sedimentarias de los Arcos de Isla del Cretácico y Paleógeno de las Formaciones Téneme, Sabaneta y gabros de la asociación ofiolítica, respectivamente. Se concluyó que las cortezas de meteorización en Baconal, El Culebro, Caimanes, Farallones y Cayo Guam son principalmente ferrosialíticas. En Cayo Guam pueden aparecer cortezas sialíticas desarrolladas sobre gabros bandeados, cuyas bandas están enriquecidas en plagioclasas.

Njila, Martínez, Fernández, & Melgar, (2010) este estudio presenta una evaluación mineralógica semicuantitativa de las cortezas de meteorización no niquelíferas en las áreas de Baconal, El Culebro, Caimanes y Farallones en la región nororiental de Cuba. Su objetivo principal fue determinar las principales fases minerales, su distribución, concentración y grado de transformación de los minerales en los perfiles de meteorización. Las muestras, 16 en total, se analizaron mediante Difracción de Rayos X; los resultados se procesaron con los programas ANALYZE y AUTOQUAN. El grado de transformación de los minerales en relación con la distribución, concentración de las fases y el avance de la meteorización se determinó por el Índice Mineralógico de Alteración. Las principales fases minerales presentes en Baconal y El Culebro son caolinita (50-75%), caolinita- montmorillonita (50-75%), cuarzo (25-50%), plagioclasas, principalmente albita (25-50%) y hematita (<10%). En Caimanes y Farallones las fases principales son caolinita hematita, cuarzo, feldspatos potásicos, principalmente ortoclasa, todos en más de un 50-75%. También están presentes la halloysita (<10%) y montmorillonita (<10%). Se evidencia una transformación mineral extrema en los horizontes intermedios y superiores en Baconal, El Culebro y Caimanes (Índice Mineralógico de Alteración con valores entre 29 y 98%). Esta transformación también se observa en el perfil completo de Farallones (98-99%). Se concluye que las cortezas de meteorización

en Baconal, El Culebro, Caimanes y Farallones son principalmente arcillas caoliníticas.

Brito Fernández, (2012) en trabajo se muestra la evaluación de las mezclas de arcillas del yacimiento Cayo Guam y Centeno con residuos sólidos de construcción, a partir de las propiedades físico - mecánicas obtenidas en los productos de estas mezclas, para su utilización en la industria de materiales de construcción. Se estudió la utilización de las mezclas de 20, 30, 40 y 50 % de residuos sólidos de construcción, valorando, mediante ensayos, los parámetros tecnológicos, contracción total, absorción de agua, resistencia a la compresión, el comportamiento de cada una de ellas durante el secado y la cocción. Los resultados obtenidos fueron comparados con las exigencias establecidas por la norma cubana NC 360 2005, con relación a los parámetros estudiados, lo que permitió conocer que la mezcla de arcilla y los residuos sólidos de construcción pueden ser utilizados para la producción de ladrillos cerámicos, siendo la mezcla con adición de 20 % de residuos sólidos la que presenta mejores propiedades físico – mecánicas.

Leyva Estrada, 2012 en su tesis titulada Caracterización litológica de las rocas del basamento del sector LD1 del yacimiento La Delta y la relación genética con las cortezas de intemperismo que le sobreyacen, el cual constituye un documento que recoge los resultados del complejo de métodos geológicos y de laboratorios, con el objetivo de caracterizar las rocas del basamento del Sector LD1, su interrelación genética con la corteza de meteorización y evaluar el potencial menífero de los perfiles de intemperismo existentes en esta parte del yacimiento. El objeto de estudio de la investigación lo constituyen las rocas del basamento del sector LD1 del Yacimiento La Delta y sus cortezas de intemperismo asociadas. En la corteza de intemperismo predominan los perfiles lateríticos estructurales y los laterítico-saprolíticos, los cuales se han desarrollado a partir de un basamento constituido principalmente por rocas peridotíticas (harzburgitas, mayoritariamente y menor proporción dunitas), peridotitas impregnadas y mafitas (gabros). Localizándose las principales áreas de corteza de meteorización productoras de mineral Ni+Co, sobre el basamento peridotítico.

Alvarez, (2013) en la investigación titulada “Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico”, realizó un estudio de la influencia de la temperatura en la activación térmica de un material arcilloso proveniente de la región de Cayo Guam en el municipio de Moa, con el objetivo de evaluar la reactividad puzolánica de los productos de calcinación y de su potencial empleo como sustituto parcial del cemento Pórtland. La muestra de arcilla fue activada térmicamente a temperaturas de 600, 750 y 900 °C, durante un tiempo de 60 minutos. La actividad puzolánica de los productos de la calcinación fue evaluada a partir de los ensayos de resistencia mecánica en morteros con un 30 % de reemplazo de cemento Pórtland por arcilla calcinada. Los morteros con sustitución de arcilla calcinada a 600 °C fueron lo que mostraron mejor actividad puzolánica, tanto para 7 como para 28 días de curado, seguidos de los elaborados con arcilla calcinada a 750 y 900 °C respectivamente.

García Quintana, (2013) en el trabajo investigativo titulado “Análisis de los factores de degradación de los suelos en la cuenca del Río Cayo Guam”, analizó que los daños causados por el hombre a los recursos naturales en las últimas décadas, son evidentes y no puede negarse que los procesos de degradación de los suelos se producen a una velocidad 10 veces mayor y en casi todas las áreas destinadas a la producción de alimentos. La metodología aplicada integra métodos de cartografía geológica de campo, procesamiento digital de la información e integración y análisis en un sistema de información geográfico; se caracterizó desde el punto de vista geológico la cuenca y se analizaron los factores naturales y antrópicos que influyen sobre la degradación de los suelos. Como resultados se describen los factores que contribuyen al proceso de degradación; el uso del suelo en algunas áreas ha eliminado la vegetación natural y transformado el medio, disminuyendo la fertilidad de los suelos y dañando cursos fluviales; en zonas de altas las pendientes(15°- 60°) y de mayor altitud los procesos erosivos son más intensos por lo que la densidad de vegetación disminuye; en las zonas de baja densidad de vegetación la acción antrópica es la principal causante de pérdida de suelo. Los escenarios prospectivos

de degradación indican el deterioro de la productividad biológica de los suelos y pérdida de biodiversidad ocuparán el 58,71% del área total de la cuenca.

Romero Ramírez, (2014) en su trabajo determinó el carácter puzolánico de arcillas de la región de Cayo Guam para su posible utilización como material cementante suplementario. Se caracterizó desde el punto de vista químico – estructural y mineralógico el material arcilloso natural y granulométrico el material calcinado a través de técnicas de Espectrometría de Absorción Atómica, Difracción de Rayos X, Análisis Termogravimétrico y Espectroscopía de Infrarrojo y la evaluación de la reactividad puzolánica a partir de la determinación del índice de actividad resistente en sistemas cemento Pórtland – arcilla calcinada a 650, 750 y 850 °C, durante una hora. Los componentes químicos principales identificados fueron, dióxido de silicio, aluminio y hierro, los cuales están asociados a las fases minerales presentes en el material arcilloso (caolinita, nacrita, dickita, halloysita, hematita, gibbsita y cuarzo). Las arcillas calcinadas bajo las diferentes temperaturas de calcinación se comportan como material puzolánico, al obtenerse para todos los casos un índice actividad resistente superior a 75 %. Los mejores valores se obtuvieron a la temperatura de calcinación de 850 °C. Del análisis realizado se concluye que el material arcilloso de la región de Cayo Guam posee potencialidades para su utilización como material cementante suplementario.

Moreira Chacón, (2015) en su trabajo se muestra la evaluación de mezclas de materiales arcillosos de la zona de Cayo Guam y arena sílice residual desechada por la Empresa Mecánica del Níquel para su utilización en la industria cerámica, ya que el insuficiente conocimiento de las propiedades físico-mecánicas de estas mezclas limita su utilización. Para ello se evaluaron las propiedades de las probetas elaboradas. Se estudiaron tres mezclas cerámicas confeccionadas con diferentes dosificaciones de arcilla con adicción de arena sílice residual, así como los factores que intervienen en la correcta elaboración de las mezclas: tamaño del grano, condiciones de secado y temperatura de cocción. Los parámetros tecnológicos determinados fueron los porcentajes de contracción lineal, pérdida de peso, absorción de agua, así como la resistencia a la compresión expresada en MPa,



donde se demuestra que cumplen con los requisitos de las normas cubanas establecidas para ladrillos cerámicos con arcilla cocida. De acuerdo a las propiedades evaluadas, la mezcla compuesta por 70% de arcilla con adicción de 30% de arena sílice residual es la que mejores resultados presenta para su utilización como producto cerámico, teniendo en cuenta además que el uso de la arena sílice residual para la obtención de mezclas cerámicas, constituye un paso importante para el aprovechamiento de los volúmenes de este material, el cual durante su vertimiento causa un efecto negativo al ecosistema. Su utilización puede generar nuevos empleos e ingresos a la economía del país.

Roger Almenares Reyes, (2016), en su artículo recoge un estudio hecho al analizar los materiales arcillosos procedentes de dos afloramientos de la región de Moa para determinar su potencialidad de uso como material cementante suplementario en la producción de cementos ternarios de base clínquer–arcilla calcinada–caliza. Las arcillas se caracterizaron mediante espectroscopía de absorción atómica (EAA), difracción de rayos X (DRX), espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) y análisis termogravimétrico (ATG). Estos métodos revelaron en las arcillas alto contenido de aluminio, moderado contenido de caolinita, una estructura desordenada y presencia de impurezas. La solubilidad del aluminio y el silicio en álcali y la resistencia a la compresión de los sistemas LC 3 es proporcional a su contenido en la arcilla, siendo superior para la de mayor contenido de caolinita y mayor desorden estructural (afloramiento D1), aunque las arcillas de ambos afloramientos pueden constituir materiales cementantes suplementarios en la producción de cementos ternarios de base clínquer–arcilla calcinada–caliza. El rango de activación térmica adecuado para ambas arcillas se ubica entre los 650 °C y 850 °C

Njila & Díaz Martínez, 2016 obtuvieron los resultados de un estudio químico-mineralógico de los perfiles lateríticos ferrosialíticos sobre rocas básicas de naturaleza oceánica y las litologías propias de los arcos de islas en la región nororiental de Cuba. El procedimiento contempló el muestreo de cinco perfiles de alteración y el análisis mediante la Fluorescencia y Difracción de Rayos X. Los

perfiles lateríticos ferrosialíticos originados a partir de rocas pertenecientes a los arcos de islas cretácico y paleógeno están constituidos por minerales secundarios que son gibbsita, caolinita, goethita, hematita y montmorillonita, mientras que los asociados a rocas básicas y vulcanógeno-sedimentarios de afinidad ofiolítica concentran gibbsita en Cayo Guam. Se aportan nuevos conocimientos químico-mineralógicos sobre los perfiles lateríticos ferrosialíticos asociados a rocas de naturaleza oceánica en Cuba nororiental, lo que ayudará en la exploración para rocas y minerales industriales y su aplicación en la industria.

Almenares Reyes, (2017) en su doctorado estableció a partir de la composición química y mineralógica, criterios de clasificación que permiten identificar las potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas como fuente de materia prima para la obtención de materiales cementantes suplementarios. En las arcillas caoliníticas cubanas (Cayo Guam, Loma Sur, La Loma y Yaguajay) provenientes de depósitos de diferente génesis geológica, que fueron caracterizadas mediante EAA, FRX, DRX y ATG, predominan minerales arcillosos del grupo de la caolinita, lo que los convierte en fuentes potenciales de MCS y a esto se le suma que presentan relativamente altos contenidos de hierro que limitan su explotación en aplicaciones de los caolines industriales. Los productos de calcinación de las arcillas estudiadas fueron caracterizados mediante FRX, DTP, BET, MEB-EDX. La evaluación de la reactividad puzolánica de estos productos fue monitoreada a través del protocolo R3, solubilidad alcalina, y resistencia a la compresión en morteros normalizados. El contenido de minerales arcillosos del grupo de la caolinita es el factor de mayor influencia sobre la reactividad puzolánica. La temperatura de activación térmica y la presencia de minerales acompañantes térmicamente inestables durante el proceso de calcinación también muestran influencia sobre la reactividad puzolánica. La reactividad puzolánica de las arcillas caoliníticas activadas térmicamente es directamente proporcional al contenido de Al soluble en medio alcalino. Los cementos de base clínquer-arcilla calcinada-caliza formulados fueron caracterizados en su estado anhidro mediante DTP y BET. Las pastas fueron caracterizadas mediante DRX, ATG y MIP. Los morteros normalizados de cementos

LC3, presentaron, a los 7 y 28 días, valores de resistencia a la compresión similar o superiores a los de un cemento P-35. Para estos cementos la formación de productos de hidratación y el consumo de portlandita muestran una correlación directa con la reactividad puzolánica de las arcillas calcinadas. Se propone un procedimiento, basado en la composición química del material ( $\% \text{Al}_2\text{O}_3 > 18,0$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 > 0,3$ ;  $\text{PPI} > 7,0$ ;  $\% \text{CaO} < 3,0$ ;  $\% \text{SO}_3 < 2,0$ ), y la representación gráfica en un diagrama que combina el  $\% \text{Al}_2\text{O}_3$  con las PPI en el intervalo de 350 a 850 °C. El procedimiento permite la clasificación y evaluación cualitativa de arcillas caoliníticas como fuente de materia prima en la obtención de MCS. Las muestras con mejores potencialidades son aquellas que presentan relativamente altos contenidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y de pérdida de masa en el intervalo de la deshidroxilación de los minerales arcillosos.

Avila Dunán & Matos Pérez, (2018) en la investigación “Potencialidades de las Arcillas del municipio Guamá, Santiago de Cuba, para su utilización como Material Cementicio Suplementario” evaluaron las potencialidades de estas arcillas sobre la base de su composición química. En las arcillas caoliníticas cubanas (Pinar de las Canas, La Anita, Sabicú y Boca de Dos Ríos) provenientes de depósitos de diferente génesis geológica, predominan minerales arcillosos del grupo de la caolinita, lo que los convierte en fuentes potenciales de MCS. La metodología utilizada expone un procedimiento, basado en la composición química del material ( $\text{Al}_2\text{O}_3 > 18,0\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 > 0,3\%$ ;  $\text{PPI} > 7,0\%$ ;  $\text{CaO} < 3,0\%$ ;  $\text{SO}_3 < 2,0\%$ ). El procedimiento permite la clasificación y evaluación cualitativa de arcillas caoliníticas como fuente de materia prima en la obtención de Material Cementicio Suplementario. Las muestras con mejores potencialidades son aquellas que presentan relativamente altos contenidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y de pérdida de masa en el intervalo de la deshidroxilación de los minerales arcillosos. Como resultados se obtienen que las Arcillas del yacimiento Sibacú presentan elevadas potencialidades para que sean utilizadas como Material Cementicio Suplementarios; mientras que las presentes en los otros yacimientos estudiados se encuentran por debajo de la norma.

Según Vera Lazcano, (2018), en su investigación estableció la composición mineralógica de las arcillas caoliníticas procedentes del yacimiento de Yaguajay. Para su uso como materias primas para la obtención de materiales cementicios suplementarios, capaces de ser empleados en la formulación de cementos con altos volúmenes de sustitución del clínker. Las materias primas fueron caracterizadas mediante ATG y DRX, en este último se demuestra que el cuarzo y la calcita acompañan a los minerales del grupo de la caolinita en la mezcla compósito. La calcinación de las arcillas se realizó a una temperatura de 800°C. La evaluación de la reactividad puzolánica fue monitoreada a través del protocolo R3 y resistencia a la compresión en morteros normalizados con un 30% de sustitución de CPO por arcillas calcinadas. El contenido de caolinita y calcita de la muestra ensayada es de 75% y 2% respectivamente. De acuerdo a los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión a los 3; 7 y 28 días obtenidos, muestran que los productos calcinados cumplen con los requisitos establecidos para cementos Portland P-35, según la NC 95:2011 y exceden los valores de la serie de referencia.

Según: Herrera del Sol, (2018) en su tesis aborda el estudio de los tipos tecnológicos que conforman las arcillas del yacimiento Yaguajay, para su explotación como material cementante suplementario. Para ello se realiza una caracterización química - mineralógica de cada tipo tecnológico, mediante los ensayos de Difracción de Rayos X (DRX), análisis químico de los pozos involucrados en el muestreo y el análisis termo – gravimétrico de una serie de muestras representativas de cada tipo de arcilla extraída del yacimiento. Se determinaron los porcentajes de las diferentes fases minerales presentes en las muestras analizadas; así como la paragénesis mineral general constituida por: caolinita, nacrita como representantes del grupo de la caolinita, y cuarzo, hematita, calcita, birnessita, anatasa y goethita como fases acompañantes. Por otro lado, se hizo una valoración de la influencia de la temperatura de calcinación y la composición mineralógica de los tipos arcillosos como factores determinantes de la reactividad puzolánica de cada compósito y la resistencia a compresión de morteros con sustitución del 30 % de CPO, por material arcilloso calcinado a temperaturas de

750, 800 y 850 °C. Para ello se realizaron ensayos de calorimetría isotérmica (protocolo R3) y resistencia a la compresión mecánica a diferentes edades, revelando los 800 °C como temperatura óptima de calcinación, siendo el compuesto B el de mayor reactividad puzolánica debido a elevadas cuantías de calcita encontradas en el mismo y el compuesto A calcinado a 800° C como el de mayor resistencia a compresión.

## 2.2 Etapa de campo.

### 2.2.1 Descripción de los itinerarios:

Durante el trabajo de campo se empleó el método de reconocimiento geológico, para esto se trabajó siguiendo una marcha ruta, para estudiar las áreas más perspectivas puesto que se encontraban identificadas por trabajos geológicos anteriores; fue al NW del Río Cayo Guam. Para realizar este trabajo se emplearon piquetas, mapas, cartas topográficas, GPS, cámara fotográfica, lápiz y libreta. En esta marcha ruta se reconocieron los principales cuerpos de arcilla caoliníticas presentes en el área, para esto se tomaron puntos de referencia con las coordenadas. Este reconocimiento se realizó con el objetivo de evaluar las potencialidades de las arcillas del depósito de Cayo Guam.

En la Figura 12 a continuación se observa la ubicación de los puntos de muestreo.



Figura 12: Esquema de ubicación de los puntos de muestreo escala 1: 7 500.

### **2.2.2 Puntos documentados.**

**Punto 1   Hora: 9:12 am   Fecha: 10-11-18   Cayo Guam**

**Coordenadas: Longitud: 20° 36´ 21,12344´´   Latitud: -74° 51´ 3,8628´´**

#### **Descripción:**

El corte tiene unos 10 m de potencia; desde 0 a los 30 cm existe una capa de suelo pardo negro, sobre el suelo se desarrolla una vegetación que puede llegar a ser considerable. Se observan raíces que no sobrepasan los 30 cm de profundidad ver Figura 13. Desde los 30 cm hasta los 5 m se observan arcillas más homogéneas de una coloración parda rojiza. El material es deleznable, poco plástico. A partir de los 5 m se observan arcillas caoliníticas de coloración abigarrada (blanco, rojo, rosado, marrón, amarillo), poseen alta plasticidad al entrar en contacto con el agua y por el contrario son muy deleznales cuando están secas. Es visible un intenso agrietamiento, atribuidos a la hidratación y deshidratación de las arcillas (grietas de desecación). Existe un segundo grupo de grietas rellenas por un material arcilloso blanco probablemente caolinita, estas poseen un espesor entre 1-2 cm y hasta 5-6 cm. El agrietamiento no tiene una orientación preferencial. Existe un acaravamiento intenso en el área por la fuerte meteorización a la que ha sido sometida y la agravante de no tener cobertura vegetal. Se aprecia un bandeamiento, o alternancia de capas oscuras y claras, probablemente heredado de la roca madre (gabros bandeados). Además, se observan gabros relícticos alterados dentro de las arcillas.



Figura 13: a) Punto 1, obsérvese la totalidad del corte, b) Relictos de gabros dentro del cuerpo de arcillas.

Se tomó en esta zona el compuesto CG-CP-1 perteneciente al horizonte caolinítico por debajo de los 5 metros. Se tomaron muestras básicas en el horizonte gibbsítico por encima de los 5 metros, ver Figura 14.

El muestreo para las muestras compuesto fue por surco, el resultado fue aproximadamente 3 kg de muestra.

Durante el muestreo por surco del punto 1 se encontraron relictos de gabros dentro de la masa de arcillas de aproximadamente 4 cm. Existiendo alternancias de bandas en las capas de arcilla de entre 4 y 5 cm de espesor, con alternancia de colores claros y oscuros que siguen un buzamiento de 52 grados consistente con el basamento rocoso.



Figura 14: Sitio de toma de muestra.

### Pozo-1:

El pozo 1 fue el único que se realizó con el tirabuzón, alcanzó los 3 metros sin llegar a tocar el basamento rocoso. Está ubicado al pie del punto número 1 por lo tanto responde a las mismas coordenadas, ver Figura 15.



Figura 15: a) perforación, b) material recuperado de la perforación manual.

Dentro del área que se documentó el punto 1 y se realizó el muestreo por surco se realizó también una perforación con tirabuzón donde se obtuvo como resultado que a partir de 0,32 m de profundidad el color de las arcillas varía a clara (gris claro a amarillo). Se encontraron laminaciones de caolín a los 0,81 m de profundidad, a partir de los 1,29 m se encontraron nidos de caolín y con algunas alteraciones de material gibbsítico. Luego de los 1,62 m comienzan a aparecer las tonalidades rojas intensas. En los 2,02 m apareció un material negro aparentemente óxido de manganeso que también se puede observar en superficie. Desde los 2,18 m aparece la caolinita en alternancia cíclica de bandas claras y oscuras hasta los 3 m tal y como ocurre en superficie.

De manera general la perforación mostró que las alternancias de bandas claras y oscuras continúa en profundidad (al menos hasta los tres metros) y que la variabilidad en profundidad en cuanto a los fenómenos observados superficialmente no es muy pronunciada. Existen en el área cárcavas que permiten estimar que la corteza de arcillas caoliníticas puede llegar a tener más de 30 m de potencia, y es bastante homogénea en cuanto lo descrito anteriormente.



**Punto 2 Hora: 10:38am 10-11-18 Cayo Guam**

**Coordenadas: Longitud: 20° 36' 33,4770'' Latitud: -74 51 6,8443''**

**Descripción:**

Se observan arcillas caoliníticas de coloración pardo rojizo por el alto contenido de hierro, además se observan zonas de coloración amarillenta donde es mayor el contenido de gibbsita. Estas arcillas son poco plásticas cuando están húmedas llegando a ser arenosas y son muy deleznales cuando se encuentran secas. En el punto de muestreo se han formado crestas por meteorización diferencial que no sobrepasan los 40 cm. Generalmente en la parte superior de las crestas se observan fragmento de gabros alterados y una zona circundante a ellos terrosa y deleznable. Aflora aquí el horizonte gibbsítico en el que se pueden observar escasos perdigones de hierro de entre 1mm y 10 cm de tamaño. Hay que mencionar que estos últimos son arrastrados a zonas más bajas producto de la intensa erosión que sufre el área. El material muestreado es poco plástico, llegando a ser arenoso, de granulometría fina y coloración abigarrada donde predomina el amarillo rojizo que puede llegar a ser naranja en algunos sectores. Considerando que sería interesante analizar la influencia de la gibbsita durante el proceso de calcinación se tomó aquí el compósito 2 ver, Figura 16.



Figura 16: a) Punto de muestreo número 2, b) muestreo por surco del punto.

**Punto 3 Hora: 11:25am 10-11-18 Cayo Guam**

**Coordenadas: Longitud: 20 36´ 33,4770´´ Latitud: -74 51´ 6,8443´´**

**Descripción:**

Se observan arcillas caoliníticas de coloración abigarrada. Estas arcillas poseen alta plasticidad cuando están húmedas y son muy deleznable cuando están secas. Se ha desarrollado un abundante agrietamiento, en algunos casos estas grietas se encuentran rellenas de caolinita. En el área se produce un acaravamiento intenso. El corte posee aproximadamente 12 m de potencia, con un desarrollo de suelo de un espesor de alrededor de 40 cm. Esta zona pertenece al horizonte caolinítico que puede sobrepasar los 30 metros de potencia, son las arcillas más plásticas y las más homogéneas. Se pueden observar dentro de ellas relictos de los gabros que le dieron origen, estos fragmentos pueden ser de entre 2 mm y 10 cm. Se observan bandas, que probablemente respondan a la alteración de las bandas de minerales félsicos y máficos que componen los gabros que le dieron origen ver, Figura 17.



Figura 17: a) Punto de muestreo 3, b) Detalle del surco.

**Punto 4 Hora: 11:50am 10-11-18 Cayo Guam**

**Coordenadas: Longitud: 20 36´ 32,4759´´ Latitud: -74 51´ 4,9210´´**

**Descripción:**

Se observan arcillas caoliníticas de coloración blanco, amarillo y rojiza con nidos y vetas de caolín y presencia de gibbsita que es el material de coloración amarilla. Esta se comporta plásticamente, ver Figura 18. El corte presenta una potencia de 15 m con desarrollo de suelo en la parte superior de un espesor de 1 m. Se observa desarrollo de acaravamiento.

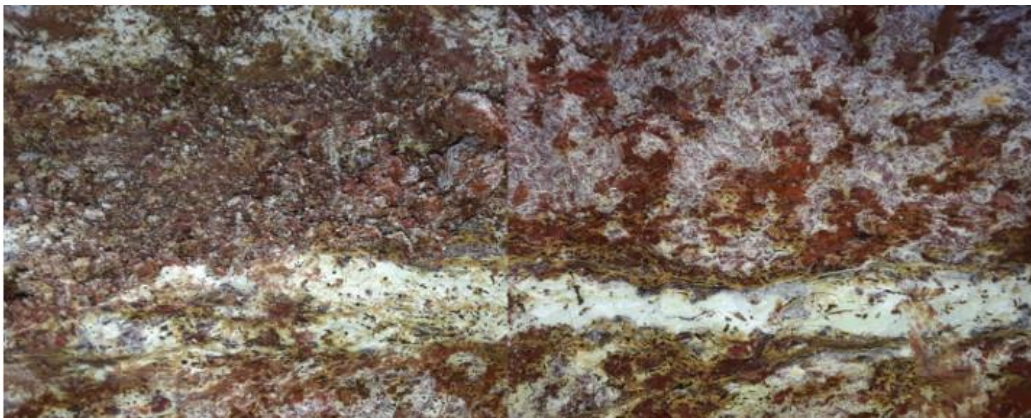


Figura 18: Caolinita abigarrada de alta plasticidad

**Punto 5 Hora: 12:05 pm 10-11-18 Cayo Guam**

**Coordenadas: Longitud: 20° 36´ 32,6368´´ Latitud: -74° 50´ 54,6748´´**

**Descripción:**

Se observan arcillas caoliníticas de coloración blanco a rojiza con presencia de nidos de caolín y gibbsita, donde los nidos de gibbsita de entre 2-3 mm, ver Figura 19. En esta área se ha desarrollado un abundante acaravamiento y muy poco agrietamiento. El espesor del afloramiento es de 10 m, del mismo se realizó el muestreo por surco CG-CP-5 compuesto 5.



Figura 19: Arcillas caoliníticas abigarradas, obsérvese en rojo los óxidos de hierro y en amarillo anaranjado las alteraciones de gibbsita.

### 2.3 Trabajo de laboratorio:

Durante el trabajo de laboratorio se emplearon los métodos Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales, Fluorescencia de Rayos X y Análisis de Carbono Azufre, Análisis Térmico Diferencial, Pérdidas por Ignición, Determinación de  $K^E$ . Para esto se tomaron tres muestras representativas de las arcillas de Cayo Guam, a las cuales se les realizó una preparación y tratamientos para obtener resultados con una mejor calidad.

#### 2.3.1 Preparación de las muestras.

Las muestras fueron preparadas en laboratorio físico del Instituto de Tecnología de Karlsruhe. Una vez desempacados fueron depositados en bandejas plásticas y secados a temperatura ambiente, Figura 20.



Figura 20: a) paquetes originales, b) apertura de los paquetes, c) bandejas receptoras

### 2.3.2 Preparación para Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales.

Las muestras para Difracción de Rayos X se dividieron en dos grupos, las primeras fueron secadas a 40 °C durante doce horas, luego fueron molidas en un molino de anillos en húmedo, usando 15ml de isopropanol y la segunda serie fue tratada a 105 °C, para lograr un mejor secado de las muestras sin llegar a comprometer la composición mineralógica, Figura 21.



Figura 21: a) cuarteo en bandejas, b) accesorios del molino de anillos, c) molino de anillos

Las muestras tratadas a 105 °C, fueron molidas a mano en un mortero de ágata durante 15 minutos aproximadamente. Se usaron 15 ml de isopropanol para la molienda en húmedo, agregando 5 ml cada 5 minutos. El resultado fue una pasta que luego se secó a 40 °C por 12 horas, Figura 22.



Figura 22: a) Mufla con ventilación interna, b) mortero de ágata, c) pasta resultante luego de la molienda en húmedo.

Al tratarse de muestras de arcillas, se decidió hacer preparaciones texturales especiales para análisis de la fracción arcillosa (DRXD). En este caso las muestras ya molidas y previamente secadas fueron colocadas en tubo de ensayo (4-5 g) donde se les agregó una mezcla de agua con amoníaco al 10%. Luego fueron introducidas en una máquina de ultrasonido por 15 minutos, Figura 23. Pasado ese

tiempo, se dejaron en reposo durante una hora para luego volver a ser sometidas a 15 minutos de ultrasonido. Luego de este procedimiento, la fracción limo arcillosa, permanece en suspensión y la fracción no arcillosa va al fondo.



Figura 23: a) Máquina de ultrasonido, b) diferentes series texturales.

Se prepararon tres series para análisis textural, la primera se colocó en placas de vidrio y se le permitió reposar durante 12 horas sin tratamiento alguno. Se nombró a esta serie T. La segunda fue tratada a 60 °C en atmósfera de glicol por 24 horas (serie Q) y la tercera fue sometida a una temperatura de 550 °C durante 24 horas (serie B).

El análisis de la combinación de estas tres series de tratamientos permite la identificación y cuantificación de los minerales arcillosos presentes en las diferentes muestras.

### **2.3.3 Muestras para Fluorescencia de Rayos X y análisis de carbono azufre.**

Las muestras para FRX se secaron a 40 °C, luego se pulverizaron en el molino de anillos. Se tomaron 2 g de muestra previamente homogenizada y cuarteada, y se calcinaron durante 2 horas a una temperatura de 950 °C. La ceniza resultante, fue colocada para su enfriamiento en una desecadora de vidrio. El método usado fue el de la perla fundida, Figura 24.



Figura 24: a) Desecadora de vidrio, b) muestras en crisoles de porcelana

Hay que destacar que en cada de una de las preparaciones, se garantizó el adecuado cuarteo y homogenización de las muestras para garantizar en el marco permitido la representatividad de los análisis.

### 2.3.4 Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales.

Las diferentes series para análisis de la fracción arcillosa, así como las series originales en un equipo Bruker con las siguientes condiciones: radiación  $\text{CuK}\alpha$  y una rejilla de divergencia de  $0,5^\circ$ . Las muestras fueron analizadas entre los  $0$  y los  $80^\circ$  ( $2\theta$ ), a un paso angular de  $0,008^\circ$  y un tiempo por paso de 30 segundos, Figura 25.



Figura 25: a) Bruker, b) bandeja con las muestras, c) muestra

Se utilizó el software HighScore Plus, con base de datos de 2015 y PDF2 complementaria, utilizando primero, subrutinas programas y luego información obtenida del Manual de Difracción de Rayos X del Servicio Geológico de los Estados Unidos, así como fichas disponibles en la base de datos [www.mindat.org](http://www.mindat.org).

Para la correcta identificación de las fases arcillosas se utilizaron los siguientes criterios. Las cloritas tienen sus picos (001) en 14 a 14,4 angstroms, dependiendo de la especie individual. Las posiciones de los picos no se modifican por la saturación de iones, la solvatación con etilenglicol o el calentamiento.

Sin embargo, los tratamientos térmicos por encima de 500 °C alteran las intensidades máximas. Normalmente, el pico de clorita (001) puede aumentar dramáticamente y los picos de orden superior pueden debilitarse notablemente. En muestras poliminerales, las cloritas se pueden distinguir de la caolinita comparando los picos de 3,58 angstrom de caolinita y 3,54 de angstrom clorita, de las esmectitas por la expansión y contracción del pico de esmectita (001) después de la solvatación con etilenglicol y el calentamiento a 400° C, y de la vermiculita por el colapso progresivo del pico de vermiculita (001) a los 550 °C. Los miembros del grupo illita por su parte se caracterizan por un intenso pico a los 10 angstrom (001) y un pico de 3,3 angstrom (003), que permanecen inalterados por la solvatación con etilenglicol o glicerol, saturación de potasio y calentamiento a 550 °C.

Para el caso de las caolinitas, en muestras mono-minerales, los miembros dioctaédricos de este grupo se identifican fácilmente porque se vuelven amorfos a los rayos X después de calentar a 550 grados y sus patrones de difracción desaparecen. La caolinita, la dickita, la nacrita y la halloysita pueden diferenciarse de la clorita mediante comparaciones del pico de caolín de 3,58 angstrom, con el pico de clorita de 3,54 angstrom y de la clorita y los miembros trioctaédricos de este grupo, mediante intercalación con acetato de potasio. El calentamiento por sí solo no distinguirá los minerales del grupo de caolinita dioctaédrica, de la clorita porque los picos de clorita (002), (003) y 004 también se debilitan por este tratamiento térmico.

Por su parte las esmectitas producen patrones de difracción de rayos X caracterizados por reflexiones basales que varían con la humedad, la exposición a ciertas moléculas orgánicas, el tratamiento térmico y los cationes intercambiables. Cuando se satura con etilenglicol, el reflejo (001) de la mayoría de las esmectitas se hinchará hasta aproximadamente 17 angstroms (aproximadamente 17,8 angstroms con glicerol); cuando se calienta a 400 ° C, la reflexión (001) colapsará a aproximadamente 10 angstroms (la cantidad exacta de colapso a menudo se relaciona con los cationes de intercambio presentes y con la esmectita en sí). Las



esmeclitas individuales a veces se pueden diferenciar por sus picos de orden superior o por saturación de cationes. Por ejemplo, las esmeclitas dioctaédricas tienen (060) reflexiones en 1,50-1,52 angstroms, mientras que las esmeclitas trioctaédricas tienen (060) reflexiones en 1,53-1,54 angstroms.

En el caso de la identificación de vermiculita, esta puede ser problemática debido a que sus características varían, la mayoría de las vermiculitas saturadas e hidratadas con Mg producen un pico de 14 angstrom (001) que no se expande en la solvatación con etilenglicol. El pico (001) de vermiculita dioctaédrica se colapsa a aproximadamente 12 angstrom después de calentar a 400 °C y a aproximadamente 11 angstroms después de calentar a 550 °C.

Los minerales de arcilla de capa mixta son materiales en los que diferentes tipos de capas de arcilla se alternan entre sí. La mezcla o interestratificación en apilamiento vertical puede ser regular (ordenada), segregada regular o aleatoria. Las arcillas de capa mixta comúnmente descritas incluyen: illitavermiculita, illita-esmeclita, clorita-vermiculita (corrensita), clorita-esmeclita, y caolinita-esmeclita.

Las arcillas de capa mixta pueden formarse debido a la intemperie que implica la eliminación o captación de cationes (por ejemplo, K), la alteración hidrotérmica o la eliminación de las capas intermedias de hidróxido. Las estructuras regularmente interestratificadas se identifican fácilmente por su reflexión basal (001), que corresponde a la suma de las separaciones de los componentes individuales y los picos subsiguientes de órdenes integrales superiores. Por ejemplo, la esmeclita illita interestratificada regularmente, cuando está saturada con Mg y glicolada, se caracterizaría por un pico de difracción (001) a aproximadamente 27 angstroms, que corresponde a la suma de las separaciones de illita (10 angstroms) y esmeclita (17 angstroms). A la inversa, las estructuras interestratificadas al azar tienen picos no integrales en posiciones intermedias entre los picos de las capas minerales individuales.

### **2.3.5 Cálculo de Pérdidas por Ignición.**

El cálculo de pérdida por ignición se realizó en el laboratorio de química del MPA en el Instituto de Tecnología de Karlsruhe. Para ello se tomaron 2 g de muestras previamente secadas a 40 y 105 °C y pulverizadas. Seguidamente en crisoles de porcelana rotulados y pesados se tomó la medida del peso del material seco. Se calcinaron a 950 °C durante dos horas y luego se dejó enfriar en una desecadora. Finalmente se midieron los diferentes pesos y se calcularon las pérdidas, que también fueron utilizadas para la corrección de los datos obtenidos por FRX.

Para el cálculo de las pérdidas por ignición a 750, 800 y 850 grados se utilizaron los datos aportados por los análisis termo-gravimétricos TG.

### **2.3.6 Análisis Térmico Diferencial y Termogravimétricos.**

Las muestras previamente molidas y secadas a 105 °C fueron analizadas en un equipo NETZ 5CH para Análisis térmico simultáneo, modelo STA 409. El intervalo de temperatura, de temperatura ambiente hasta 1000 °C, a razón de 10 °C/min. Se utilizó atmósfera sintética de oxígeno. Se usaron cantidades cercanas a los 2 mg para cada ensayo.

### **2.3.7 Determinación de K<sup>E</sup>**

La figura 26 muestra la fórmula usada para el cálculo del caolín equivalente. Los datos de masa a los diferentes intervalos a temperatura fueron extraídos de los termogramas obtenidos. Para la pre selección química se usaron los criterios expresados en la tabla 2.

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

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

Figura 26: Fórmula empleada para calcular el porcentaje de caolín equivalente (Almenares-Reyes, 2017).

Tabla 2: Criterios límites para cumplir con los requisitos de materia prima para el LC<sup>3</sup> (Almenares-Reyes 2017).

	Criterios límites
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	>18,0 %
CaO	<3,0 %
SO <sub>3</sub>	<2,0 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	>0,3
PPI	>7,0 %

### 2.3.8 Determinación de alúmina y sílica disueltos en álcalis:

Mediante este método se determinaron los elementos (aluminio y silicio) solubles en hidróxido de sodio (NaOH). A continuación, se describe la técnica de análisis:

La muestra se descompone mediante la solución de NaOH al 0,5N. De la muestra se pesa 0,2 g en un beaker de 200 mL, se lleva a la plancha de calentamiento a 250 °C por un periodo de 3 min, luego se enfría y se trasvasa a un volumétrico de 250 mL donde llega a su volumen final. Se homogeniza y se toma una alícuota de 20 mL de la solución anterior y se transfiere a un volumétrico de 50 mL donde se le añaden 5 mL de HCl 1:1 y se enraza con agua destilada y se vuelve a homogenizar.

### **2.3.9 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 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 Cuba 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 se presenta 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 distintos contenidos de caolín calculados mediante estas fórmulas, que fueron resultado del artículo: (Avet, François et al., 2016), ver Figura 27.

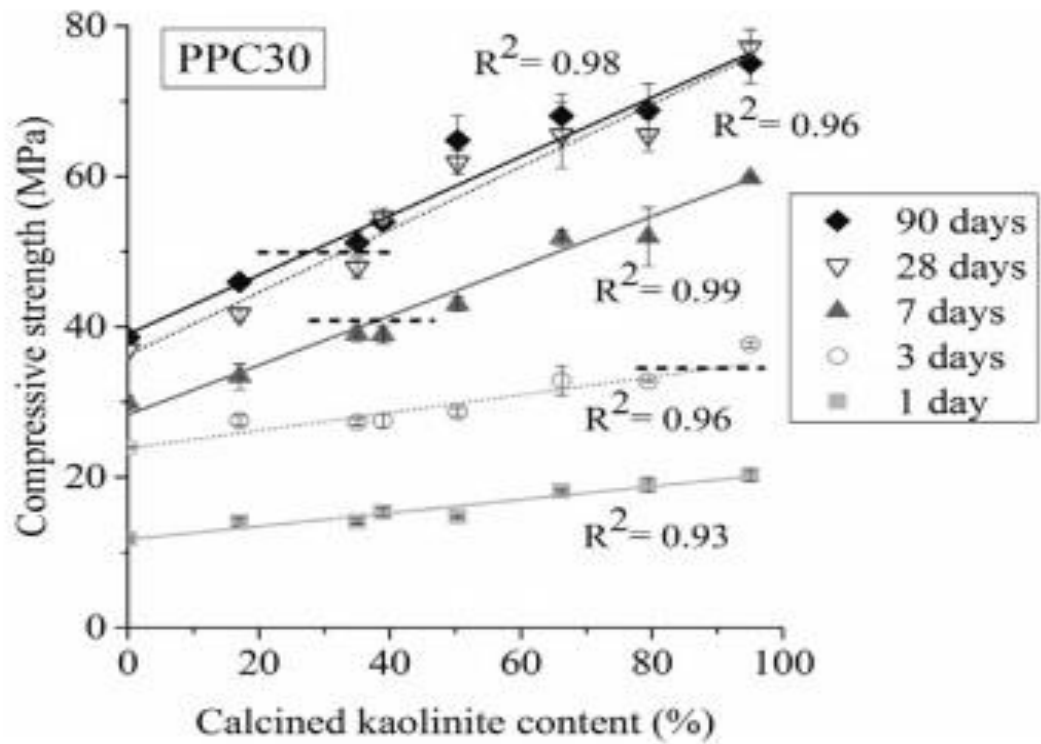


Figura 27: Diagrama para la dosificación de PPC30 aplicando la correlación según el contenido de caolín equivalente (Avet, François et al, 2016).

## CAPITULO III: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

### 3.1 Resultados de la caracterización

#### 3.1.1 Resultados del análisis químico.

En la Tabla 3 se observan los resultados de la composición química realizado de la muestra compósito obtenida de la mezcla de las muestras tomadas en los 5 puntos de muestreo. Se analizaron doce elementos químicos expresados en óxidos, de los cuales presentaron bajos contenidos el (sodio, potasio y calcio), lo contrario ocurre con el silicio, hierro y aluminio, típico de una corteza de meteorización desarrollada sobre gabros. Los bajos valores de magnesio y sodio tras la descomposición de los gabros demuestran una pobre migración geoquímica de estos elementos a las zonas superiores del perfil. Después de comparar con criterios límites de Almenares Reyes (2017) se pudo establecer que las arcillas caoliníticas del depósito cumplen con estos con los criterios de preselección.

Tabla 3: Análisis químico de la muestra compósito de la mezcla de los 5 puntos documentados.

Muestra	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
Compósito CG	37,15	0,39	31,66	10,29	0,56	0,29	0,09	0,07	ND	ND	0,27	0,58

#### 3.1.2 Resultados de la difracción de rayos X (DRX y DRXD) Cayo Guam (CG).

Los resultados de la DRX y DRXD permitieron identificar las fases minerales de la muestra compósito, ver Tabla 4.

Tabla 4: Fases identificadas en la muestra.

No	Fases minerales	Fracción no arcillosa	Fracción arcillosa
1	Caolinita	X	X
3	Nacrita	X	X

5	Dickita	X	X
4	Goethita	X	
5	Nontronita	X	X
6	Hematita	X	

El análisis de la muestra para DRX permitió establecer la presencia de caolinita, nacrita, hematita, nontronita, goethita y dickita, ver Figura 28 registro difractométrico de la muestra.

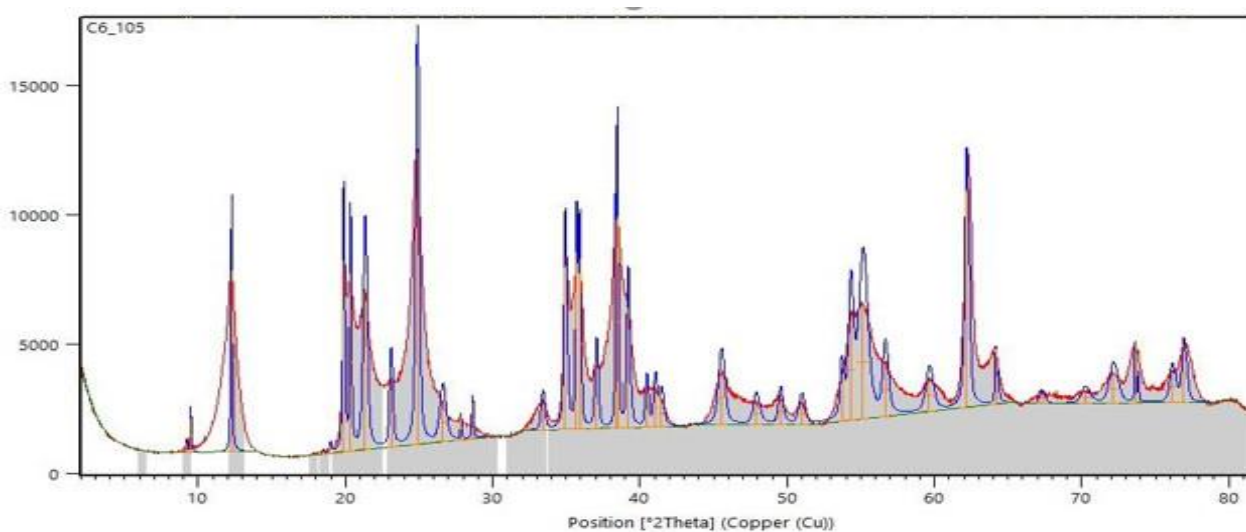


Figura 28: Grafico de la DRX de Cayo Guam

El análisis de las muestras con preparación textural para DRXD permitió establecer la presencia de caolinita, nacrita y dickita con reflejos fuertes cercanos a los 7,23-7,15 angstroms, que desaparecen por completo al someter a la muestra a temperaturas de 550 °C. También se encontraron los reflejos 4,37 caolinita, 4,15 dickita, 4,45 nacrita, 3,80 dickita, 3,57 caolinita, ver Figura 29.

Se observan unos pequeños reflejos cercanos a los 10 angstroms que se asumen pertenecen a la nontronita, esto se ajusta con esos mismos reflejos, una vez calcinada la muestra a 550 °C, y a la vez encaja con el hecho de que durante el termograma la descomposición comenzó alrededor de los 350 grados.

La cuantificación de las fases arcillosas arrojó que predomina la caolinita-nacrita-dickita (98%), quedando la nontronita en menor proporción (2%). En grado de

desorden estructural no permite hacer una diferenciación más acertada entre los diferentes minerales del grupo del caolín.

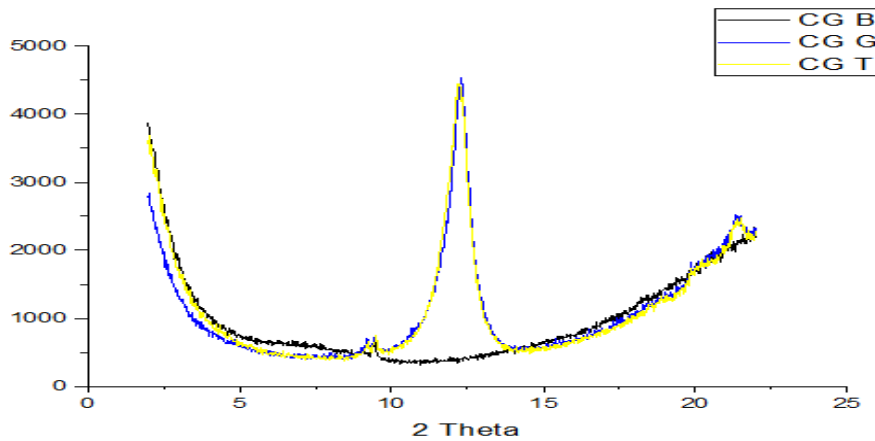


Figura 29:Gráfico de DRXD.

### 3.1.3 Resultados del análisis térmico diferencial.

En la muestra compósito la pérdida de masa ocurre en dos momentos fundamentales, hasta los 200 °C ocurre un efecto endotérmico acompañado por pérdida de masa asociado a la liberación del agua estructural de los minerales arcillosos, especialmente la nontronita identificada por DRX. Entre los 280 y 340 °C ocurren unos picos endotérmicos casi imperceptibles, asociados a la descomposición de gibbsita y goethita, extendiéndose hasta los 500 °C probablemente asociado a la descomposición de la nontronita. El segundo intervalo de descomposición comienza alrededor de los 400 °C y se extiende hasta los 600 °C. Se asume que se descomponen aquí los minerales del grupo del caolín (caolinita y nacrita), Figura 30.



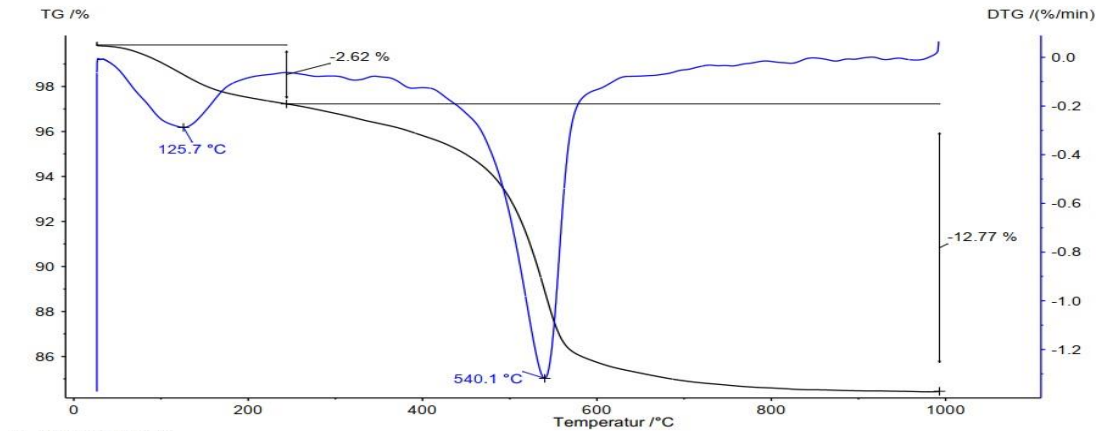


Figura 30: Análisis Termogravimétrico de la muestra.

### 3.1.4 Resultados del análisis petrográfico de la roca de basamento.

En la sección delgada se observa una roca con abundantes cristales de piroxenos y plagioclasas y probablemente pequeños cristales de olivino. Los cristales de plagioclasas son euhédricos, con relieve bajo, débil birrefringencia con colores de interferencia gris-blanco, que pueden llegar a tener tonalidades de amarillo debido a que la sección delgada está gruesa. El ángulo de extinción, está medido hasta  $34^\circ$  a la derecha y  $37^\circ$  hacia la izquierda, promediando  $35,5^\circ$ , por lo que pudiera ser una plagioclasa labradorita. Se observan también cristales de piroxenos incoloros en sección delgada, con cristales anhédricos, birrefringencia moderada, con un ángulo de extinción de  $42^\circ$ , pudiendo tratarse de un miembro de la serie de clinopiroxenos augita-enstatita. Se observan también cristales anhédricos, con alta birrefringencia, incoloros en sección delgada, que pudieran ser de olivino, también se observan menas metálicas. Por lo tanto, se concluye que las rocas que forman el basamento son gabros olivínicos, ver Figura 31.

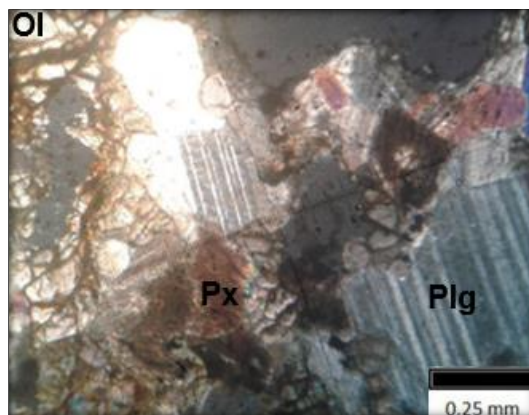


Figura 31: Microfotografía de la sección delgada. (se observan los piroxenos con su clivaje en una dirección) Px – piroxeno, Plg - plagioclasa y Ol - olivino.

### 3.1.5 Cálculo del caolín equivalente y PPI.

Aplicando el procedimiento de calcinación de Almenares Reyes (2017) se determinó que la PPI en los intervalos de 750, 800 y 850 °C es de 12,03 promedio, y que las arcillas caoliníticas del depósito Cayo Guam presentan contenidos favorables de caolín equivalente para la fabricación de LC3, reportando algunos de los valores más elevado en comparación con arcillas caoliníticas identificadas en el país, promediando 86,2 % en las muestras calcinadas ver, Tabla 5.

Tabla 5: Resultados de la calcinación.

Cayo Guam	PPI 750	PPI 800	PPI 850
	11.9234543	12.0487761	12.1301087
	K <sup>E</sup> 750 ° C	K <sup>E</sup> 800 ° C	K <sup>E</sup> 850 ° C
85.4115636	86.3092847	86.8918961	

Lo anterior prueba que los minerales térmicamente activos continúan descomponiéndose más allá de los 800 grados.

### 3.1.6 Resultados de la actividad puzolánica en la solución alcalina.

El análisis de la relación temperatura de calcinación con el proceso de disolución de aluminio y silicio permite establecer (ver Figura 32) que existe una tendencia del silicio a aumentar la solubilidad en NaOH con el aumento de la temperatura. No

pasa así con el aluminio que tiene tendencia a disminuir en la solución de NaOH por encima de los 800 °C, ya que a los 850 °C se comienzan a formar fases amorfas que impiden la solubilidad de este elemento.

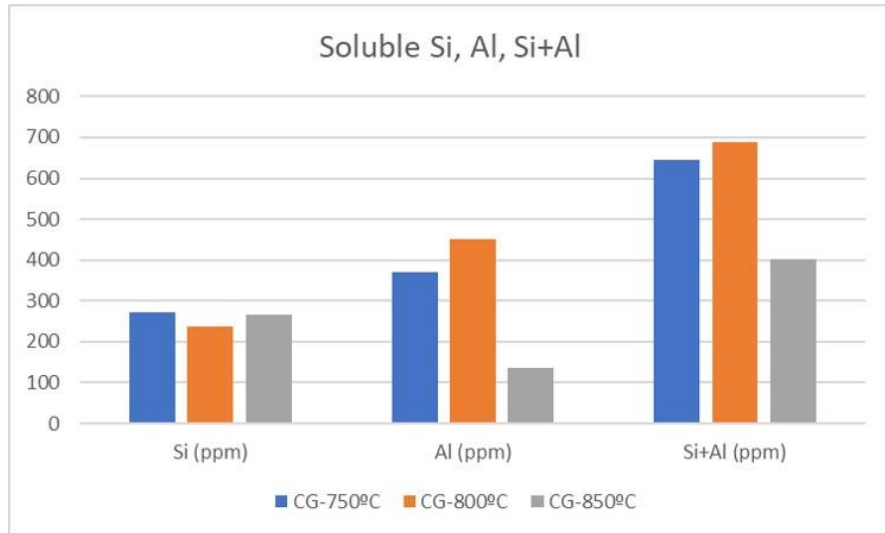


Figura 32: Disolución del Si, Al y Si+Al en una solución de NaOH

Es válido señalar que existe una relación que plantea que, a mayor reactividad puzolánica, mayor resistencia a la compresión. Existe a la vez una correlación entre los contenidos de alúmina y la resistencia a la compresión. Por tanto, a pesar de que la sumatoria de Si y Al, inducen a creer que los 850 grados sería la temperatura idónea para los mayores valores de reactividad, realmente se debe analizar esto al detalle pues los contenidos de aluminio son menores y esto podría provocar una caída de los valores reales de resistencia a la compresión mecánica.

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

Empleando el método de correlación entre la resistencia a la compresión de los morteros y el contenido de caolín equivalente en las muestras arcillosas (Avet et al. 2016), se puede estimar el comportamiento de la resistencia a la compresión. Se observa que la tendencia es a aumentar la resistencia a la compresión, con el aumento de la temperatura, en consonancia con el aumento de la reactividad puzolánica. En todos los casos los resultados están por encima de la norma para la

dosificación de PPC30, obteniéndose los valores óptimos de resistencia a la compresión para una temperatura de 850 ° C a los 28 días igual a 73,6 MPa ver Figura 33, pero a pesar de que, se predice que los valores superiores de resistencia a la compresión son los de la dosificación que utiliza las arcillas calcinadas a 850 ° C, se recomienda usar 800 ° C como temperatura máxima de calcinación, dado el hecho que ocurre la caída de los valores de solubilidad de aluminio en NaOH a los 850 ° C.

Tabla 6: Resistencia a la Compresión

Días	NC 2013	PPC 30 750 ° C (MPa)	PPC 30 800 ° C (MPa)	PPC 30 850 ° C (MPa)
3	17.6	35.18	35.31	35.40
7	28.7	56.60	56.90	57.10
28	35.2	72.94	73.34	73.60

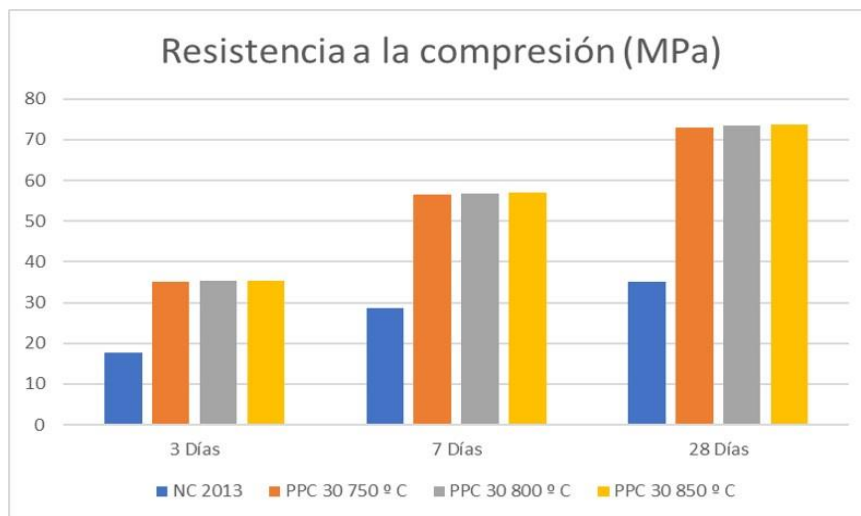


Figura 33: Determinación de resistencia a la compresión por el método de (Avet et al, 2016)

### 3.1.8 Resultados evaluación de las potencialidades del depósito arcillas caoliníticas de Cayo Guam como fuente de materiales cementante suplementarios.

Según la clasificación de potencialidades desarrollada por Almenares Reyes (2017), ver Tabla 7, las arcillas calcinadas a 750, 800 y 850 °C del depósito son el tipo I, 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. El contenido de minerales arcillosos para la muestra cuya composición las ubica por encima de esta línea A se obtiene extrapolando su ubicación a la línea A, a partir de una línea paralela al eje de contenido de PPI, o sea, tomando el contenido de  $Al_2O_3$  como criterio definitorio ver Figura 34.

Tabla 7: Clasificación de potencialidades del depósito arcilloso.

<b>Tipo</b>	<b>Composición</b>	<b>Potencial</b>
I	$\%K^E > 60$	Alto
II	$60 > \%K^E > 40$	Bueno
III	$\%K^E < 40$	Moderado
IV	Contenido variable de $K^E$ , contaminadas con minerales no arcillosos, relativamente abundantes, térmicamente activos, que se descomponen en el mismo intervalo de temperatura de los minerales arcillosos	Debe valorarse de manera individual

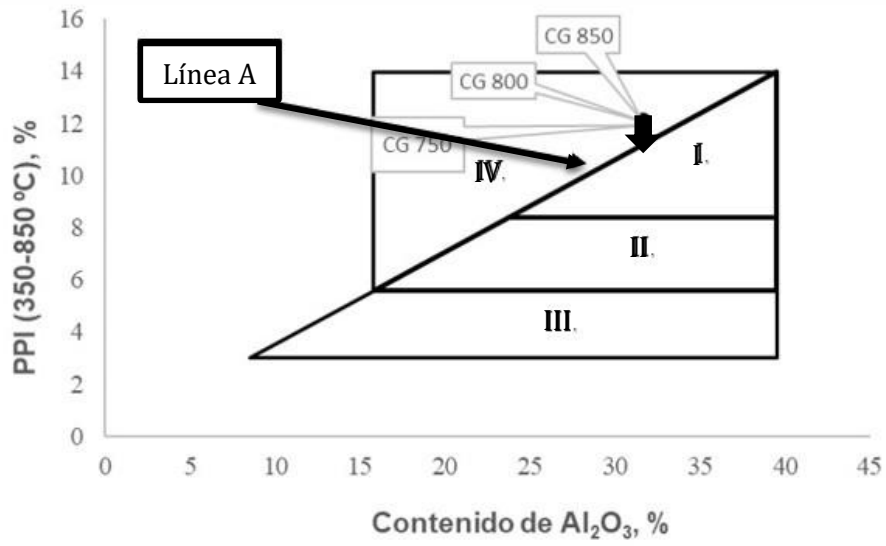


Figura 34:Potencialidades del depósito de arcillas caoliníticas Cuyo Guam.

## **Conclusiones:**

- Se caracterizaron química y mineralógicamente las arcillas caoliníticas del depósito Cayo Guam obteniendo como resultados que las arcillas según su composición cumplen con los criterios límites. La paragénesis general está constituida por caolinita, gibbsita, goethita, hematita, dickita, nontronita y nacrita.
- Se caracterizó petrográficamente la roca madre que dio origen a las arcillas caoliníticas siendo las mismas gabros olivínicos.
- Se evaluaron las pérdidas por deshidroxilación y el cálculo de caolín equivalente obteniéndose como los valores promedios 12,3% y 86,2% respectivamente.
- Se determinó la influencia de la temperatura en la actividad puzolánica, resultando que la mayor reactividad puzolánica se obtiene a los 800 °C dados los valores de solubilidad de silicio y aluminio.
- Los valores óptimos de resistencia a la compresión (72,94 MPa) se obtienen a los 28 días y a una temperatura de 800 ° C.
- Se establece que las arcillas caoliníticas del depósito Cayo Guam poseen altas potencialidades para utilizarse en la producción de materiales cementantes suplementarios.

## **Recomendaciones:**

- Se recomienda confeccionar con estos materiales morteros normalizados para verificar los resultados obtenidos según el método de correlación de François Avet y profundizar en el papel del aluminio soluble en la resistencia a la compresión mecánica.



## Referencias Bibliográficas:

1. 527, N., 2013. *Cemento hidráulico-Métodos de ensayo-Evaluación de las puzolanas* [en línea]. 2013. S.l.: s.n. Disponible en: <http://www.nc.cubaindustria.cu>.
2. ALMENARES-REYES, R.S., 2017. *Potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas para la obtención de materiales cementicios suplementarios*. Tesis Doctoral. Santa Clara, Cuba: Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas.
3. ALMENARES REYES, R.S., ALUJAS DÍAZ, A., POLL LEGRÁ, L., BASSAS NOA, P.R., BETANCOURT RODRÍGUEZ, S., MARTIRENA HERNÁNDEZ, J.F. y LEYVA-RODRÍGUEZ, C.A., 2016. Evaluación de arcillas caoliníticas de Moa para la producción de cemento de base clínquer-arcilla calcinada-caliza (LC 3 ). *octubre-diciembre*, pp. 63-76.
4. ALUJAS, A., 2010. *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponentes*. S.l.: Universidad Central "Marta Abreu de Las Villas.
5. ALVAREZ, A., 2013. *Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez".
6. AVET, F., SNELLINGS, R., ALUJAS, A., BEN, M. y SCRIVENER, K., 2016. Development of a new rapid , relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research*, vol. 85, pp. 1-11. ISSN 0008-8846. DOI 10.1016/j.cemconres.2016.02.015.
7. AVILA, D., 2010. *Caracterización mineralógica y tecnológica de materiales*

- arcillosos del territorio de Moa para su empleo en la Industria Local*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico De Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
8. BATISTA, A., 1998. *Características geológicas y estructurales de la región de Moa a partir de la interpretación del levantamiento*. Habana: Ministerio De Educacion Superior ISPJAE Cemento De Bajo Carbono.
  9. BATISTA, R., 2007. *Valoración del Potencial de Los Recursos Minerales para la Industria del Cemento en Cuba*. UCLV: Marta Abreu de Las Villas.
  10. BETANCOURT, S., 2012. *Cemento Portland Ordinario*. Aglomerantes. ,
  11. BRITO, M., 2012. *Mezclas de arcillas y residuos sólidos de construcción para su utilización en la industria de materiales* . Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
  12. CASTILLO, R., 2010. *Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza*. Tesis Doctoral. Santa Clara, Cuba: Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas.
  13. CHACÓN, M., 2015. *Evaluación de mezclas de materiales arcillosos de la zona de Cayo Guam y arena sílice residual para su utilización en la industria cerámica*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
  14. CISNERO, A., 2010. *Caracterización Geoquímica De Las Cortezas De Meteorización Alíticas En Cuba Oriental: Zonas De Moa-sagua De Tanamo*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
  15. CSI, 2010. *Cement Industry Energy and CO2 Performance «Getting the Numbers Right»*. 2010.
  16. CUBADEBATE.CU, 2018. *Cuba produce cemento ecológico menos costoso*

y más resistente. .

17. CRESPO, E. Quintana. Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. Facultad de Ciencias Exactas, Física y Naturales. Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba, 2005, vol. 283.
18. DOPICO, J.J., MARTIRENA HERNANDEZ, F. y DAY, R.L., 2008. Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario. , pp. 171-178.
19. DUNÁN AVILA, P.L., 2018. Potencialidades de las Arcillas del municipio Guamá, Santiago de Cuba, para su utilización como Material Cementicio Suplementario. , pp. 1.
20. FADEL, M., 2005. *Evaluación preliminar y caracterización de la manifestación de caolinitas en la zona de Cayo Guam, Moa*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
21. GALLO, R., 2010. Valoración del potencial de los recursos minerales para la industria del cemento en Cuba. IGP, Instituto de reactivos y materiales, CEMVID. ,
22. GARC, D., 2013. *Análisis de los factores de degradación de los suelos en la cuenca del Rio Cayo Guam*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
23. GECEM, 2012. *Anuario estadístico 2012. Diagnostico del Grupo Empresarial del Cemento*. 2012.
24. HENDRIKS, C., WORRELL, E. y JAGER, D.D., 1998. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. Paper presented at the Proceedings of the fourth international conference on greenhouse gas control technologies. ,

25. HERRERA DEL SOL, D., 2018. *Evaluación de los tipos tecnológicos de arcillas del yacimiento Yaguajay, para la producción de cemento de bajo carbono LC3*. S.I.: Universidad Central Marta Abreu Las Villas.
26. LEYVA, B., 2012. *Caracterización litológica de las rocas del basamento del Sector LD1 del Yacimiento La Delta y su relación genética con la corteza de intemperismo que le sobreyace*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez".
27. MARTIRENA HERNÁNDEZ, José F. Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clinker de cemento Portland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa/José F. Martirena Hernández. 2004. Tesis Doctoral. Tesis de grado de Doctor en Ciencias.
28. MARTIRENA HERNANDEZ, F., 2011. Context of Cementitious Materials in developing countries. Paper presented at the Pre Congressal courses, Madrid, España. ,
29. MASSAZZA, F., 1993. Pozzolanic cements. Cement and Concrete composites. , pp. 185-214.
30. NJILA, T., 2016. Estudio Químico-mineralógico De Los Perfiles Lateríticos Ferrosialíticos En Los Sectores Téneme. , pp. 67-83. DOI 10.15517/rgac.v54i0.21149.
31. NJILA, T., MARTÍNEZ, R.D., FERNÁNDEZ, J.P. y MELGAR, G.O., 2010. Evaluación mineralógica semi-cuantitativa de las cortezas de meteorización no níquelíferas en la región nororiental de Cuba. , no. January, pp. 1-15.
32. OLIVA, G., 1999. Nuevo Atlas Nacional de Cuba. Instituto de Geografía. , pp. 132.
33. ONEI, 2012. *Investigation of blended cement hydration by isothermal*

*calorimetry and thermal analysis*. 2012. Cuba: s.n.

34. OROZCO, Gerardo. Caracterización de las arcillas de Cayo Guam. Informe técnico. ISMM, 1995. PÉREZ GARCÍA, L.A., 2015. Caracterización por medio de Espectroscopia Infrarroja de las manifestaciones de caolinita del río Cayo Guam. , pp. 26.
35. QUINTAS, Félix. Análisis estratigráfico y paleogeografía del Cretácico Superior y del Paleógeno de la provincia Guantánamo y áreas cercanas. Moa (Tesis Doctoral) 145p, 1989.
36. RABILERO, A., 1993. Una contribución al estudio del aglomerante cal-puzolana. Reporte al IX Forum de Ciencia y Técnica. Havana. Cuba. ,
37. RODRÍGUEZ, C., 2014. *Evaluación de propiedades físico-mecánicas en morteros de albañilería a partir de cementos con sustituciones de clínquer por arcillas calcinadas y caliza*. S.l.: Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
38. RODRIGUEZ INFANTE, A., 2005. *Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica*. S.l.: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
39. RODRÍGUEZ INFANTE, A., 1998. *Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de genesis tectónica*. S.l.: ISMMM.
40. RODRÍGUEZ, R., 2000. *Estudio Petrológico De Las Rocas De Afinidad Ofiolítica Portadoras De Ilmenita De La Zona De Cayo Grande En El Macizo Moa – Baracoa*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
41. RODRÍGUEZ, R., MORENO, J., PROENZA, J. y OROZCO, G., 2001. Petrología de las Rocas Plutónicas de Afinidad Ofiolítica Presentes En Zona De Cayo Grande (Macizo Ofiolitico Moa-Baracoa), Cuba Oriental. , no. 1998,

pp. 31-44.

42. ROMERO, Y., 2014. *Caracterización De La Actividad Puzolánica De Arcillas De La Región De Cayo Guam Para Su Utilización Como Material Cementicio Suplementario*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
43. SCHNEIDER, M., ROMER, M., TSCHUDIN, M. y BOLIO, H., 2011. Sustainable cement production—present and future. *Cement and Concrete research.* , pp. 642-650.
44. SCRIVENER, K., 2007. *Durability course. EPFL, Switzerland.* 2007. S.l.: s.n.
45. SIVERIO FERNÁNDEZ, S., 2016. *Evaluación de arcillas de bajo grado de caolinita del depósito El Yigre para la producción de cemento de bajo carbono. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.* S.l.: Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
46. 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.* S.l.: Universidad Central Marta AbreuLas Villas.
47. VILTRES MILÁN, Y., 2011. *Evaluación de riesgos por deslizamiento en taludes y laderas del sector este del municipio Moa.* S.l.: Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.
48. VIZCAÍNO, L.M., 2014. *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponentes.* S.l.: Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.