



Universidad de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Geología y Minas
Departamento de Geología

Título: Potencialidades de las características mineralógicas de los residuos rojos del yacimiento Dumañuecos para el desarrollo de materiales cementicios

(Tesis en opción al título académico de Máster en Geología)

Autor: MSc. Angel Eduardo Espinosa Borges

Tutor(es): Dr.C Carlos Alberto Leyva Rodríguez
Dr.C Roger Samuel Almenares Reyes
MSc. Liodilio Reynerio Alarcón Pérez

Consultor: Ing. Luis Alberto Pérez García

Moa, 2023



Universidad de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez"

Facultad de Geología y Minas

Departamento de Geología

Título: Potencialidades de las características mineralógicas de los residuos rojos del yacimiento Dumañuecos para el desarrollo de materiales cementicios

(Tesis en opción al título académico de Máster en Geología)

Autor: MSc. Angel Eduardo Espinosa Borges

Tutor(es): Dr.C Carlos Alberto Leyva Rodríguez
Dr.C Roger Samuel Almenares Reyes
MSc. Liodilio Reynerio Alarcón Pérez

Consultor: Ing. Luis Alberto Pérez García

Moa, 2023

PENSAMIENTO



“... Lo que sabemos es una gota, lo que ignoramos es un océano.”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Declaro que soy autor(a) de este trabajo de tesis y que autorizo a la Universidad de Moa a hacer uso del mismo, con la finalidad que estime conveniente.

Firma: _____



MSc. Angel Eduardo Espinosa Borges
angeleduardoespinosaborges@gmail.com

Angel Eduardo Espinosa Borges autoriza la divulgación del presente trabajo de diploma bajo licencia Creative Commons de tipo **Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada**, se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de las obras y no realice ninguna modificación de ellas. La licencia completa puede consultarse en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/legalcode>

Angel Eduardo Espinosa Borges autoriza al departamento de Geología de la Universidad de Moa a distribuir el presente trabajo de tesis en formato digital bajo la licencia Creative Commons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en el repositorio de materiales didácticos disponible en: <http://geologia.mineria.edu.cu/textuales/tesis>

Angel Eduardo Espinosa Borges autoriza al departamento de Geología de la Universidad de Moa a distribuir el presente trabajo de tesis en formato digital bajo la licencia Creative Commons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en la biblioteca digital disponible en: <http://bibliotecadigital.ismm.edu.cu>

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor Roger por pasar la barrera de la carrera y brindarme sus ilimitados conocimientos sobre el tema y sin los que este trabajo no hubiera salido con la calidad requerida.

A mi tutor Carlos Leyva por siempre preocuparse y ayudarme en todo momento. Por ofrecerme siempre sus invaluable consejos y su inmensa experiencia.

A mi tutor Leodilio por todo su apoyo y colaboración sin la cual no se hubiera materializado esta investigación.

A todos los profesores de la Universidad de Moa que de una manera u otra estuvieron involucrados en especial para los profesores del departamento de geología por todo su apoyo.

A los colegas del grupo de geotecnología de los materiales por su apoyo y preocupación y con los que he podido compartir los momentos más tensos y difíciles de esta investigación en especial Liván, Yosvany, Carlos y Alfredo.

A los colegas de la Oficina Nacional de Recursos Minerales en especial Arieski y Rubén que me prestaron su ayuda e informaciones invaluable que viabilizaron esta investigación. A todos lo que de una manera u otro estuvieron involucrados y que sin su invaluable apoyo no se hubiera podido concebir este trabajo y que por la brevedad no he podido mencionar.

DEDICATORIA

A mi mamá por estar siempre a mi lado, aun cando me he encontrado lejos y por siempre tener esa visión del futuro tan prodigiosa que le permite tener siempre un consejo certero.

A mi papá por su apoyo y guía, siendo siempre un ejemplo a seguir para mí.

A mi tía Yanara por su preocupación y apoyo en todos los momentos de mi vida.

A mi novia por su apoyo y comprensión en los momentos más críticos.

A mi pequeña Aghata Esmeralda por ser fuente constante de inspiración y energías para dar cada día más de mí.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo la caracterización mineralógica de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos para establecer sus potencialidades en la sustitución del cemento Portland. Las muestras del yacimiento fueron caracterizadas química y mineralógicamente mediante técnicas de Difracción de Rayos X y Espectrometría de Absorción Atómica. Se calcularon los contenidos de caolín equivalente y se determinaron las pérdidas por ignición. Se realizaron análisis de actividad puzolánica mediante el método de solubilidad de aluminio y silicio y la correlación del contenido de caolín equivalente y la resistencia a la compresión. La composición química de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos cumple con los criterios establecidos por la norma cubana TS 528: 2013 (NC TS 528:2013 2013), considerándose como adiciones minerales para el cemento de tipo N. Según la composición mineralógica se estableció que los residuos arcillosos rojos del Yacimiento Dumañuecos presentan un elevado contenido en minerales arcillosos del grupo de la caolinita representados por caolinita y nacrita; lo que refleja su gran potencial para ser usadas como puzolanas. Los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos según la metodología de Almenares Reyes son arcillas de tipo IV, sin embargo la variabilidad durante el proceso de activación está asociada a la presencia de óxidos de Fe y Al, lo que no tiene una incidencia negativa para su uso como puzolanas por lo que se consideran con buenas perspectivas para esta aplicación.

PALABRAS CLAVES:

Materiales cementicios suplementarios, puzolanas, residuos arcillosos

SUMMARY

The present work has as the mineralogical characterization of the red clay residues of the Dumañuecos deposit to establish its potential in replacing Portland cement. The deposit samples were chemically and mineralogically characterized using X-ray Diffraction, Differential Thermal Analysis and X-ray Fluorescence techniques. The equivalent kaolin contents were calculated and the ignition losses were determined. Pozzolanic activity analyzes were carried out using the aluminum and silicon solubility method and the correlation of the equivalent kaolin content and compressive strength. According to the chemical concentration of the red clay residues from the Dumañuecos deposit, it was found that they can be considered as mineral additions for type N cement according to the Cuban standard TS 528: 2013 (NC TS 528:2013 2013). According to the mineralogical composition, it was established that the red clay residues of the Dumañuecos Deposit have a high content of clay minerals of the kaolinite group represented by kaolinite and nacrite; which reflects its great potential to be used as pozzolans. The red clay residues from the Dumañuecos deposit according to the Almenares Reyes methodology are type IV clays, however the variability during the activation process is associated with the presence of Fe and Al oxides, which does not have a negative impact on their use as pozzolans so they are considered to have good prospects for this application.

KEY WORDS:

Supplementary cementitious materials, pozzolans, clay residues

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Situación Geográfica	16
1.2. Relieve	16
1.3. Red hidrográfica	17
1.4. Características geológicas regionales	17
1.4.1. Estratigrafía regional	17
1.4.2. Tectónica	19
1.4.3. Geomorfología regional.....	19
1.4.4. Características del vulcanismo regional	20
1.5. Geología del área de estudio.....	20
1.5.1. Génesis del yacimiento Dumañuecos	22
1.5.2. Composición química.....	23
1.5.3. Composición mineralógica.....	23
1.6. Materiales de escombrego del yacimiento Dumañuecos.....	24
1.6.1. Características del material estéril del yacimiento Dumañuecos	24
1.6.2. Volúmenes de extracción de estériles durante la explotación minera del yacimiento Dumañuecos	24
1.6.3. Características de las escombreras del yacimiento Dumañuecos.....	24
1.7. Conclusiones parciales	25
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
2.2. Trabajos de documentación y muestreos.....	26
2.4. Trabajos de laboratorio.....	28
2.4.1. Preparación.....	28
2.4.2. Análisis mineralógico mediante difracción de rayos X	28
2.4.3. Determinación del contenido de caolinita equivalente	29
2.4.4. Espectrometría de Absorción Atómica	31
2.4.4. Metodología de evaluación preliminar de materiales arcillosos como fuentes de SCM	32
CAPÍTULO III - RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	36
3.1. Características geoquímicas de los residuos rojos arcillosos de Dumañuecos	36
3.2. Comportamiento de las pérdidas por ignición y el caolín equivalente de los residuos rojos arcillosos de Dumañuecos	37
3.3. Características mineralógicas de los residuos rojos arcillosos de Dumañuecos	39
3.4. Evaluación de las potencialidades para la producción de cemento de bajo carbono según la metodología de Almenares Reyes del 2017	42
3.5. Conclusiones parciales	43
CONCLUSIONES.....	45
RECOMENDACIONES	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de ubicación geográfica del yacimiento de caolín Dumañuecos	16
Figura 2: Cantera del yacimiento Dumañuecos.....	20
Figura 3: Mapa geológico del yacimiento Dumañuecos (modificado a partir del mapa geológico del IGP escala 1:100000 del año 2017).....	21
Figura 4: Perfil esquemático del yacimiento Dumañuecos modificado de Escobar Loret de Mola 2018b (González Jiménez, Pérez García y Espinosa Borges 2022)	23
Figura 5: Flujograma de la investigación.....	26
Figura 6: Materiales arcillosos residuales de la explotación del yacimiento de caolín Dumañuecos, A: arcillas caoliníticas blancas; B: residuos arcillosos rojos; C: materiales arcillosos de la zona de destape.....	27
Figura 7: Escombrera de residuos arcillosos rojos de la explotación del yacimiento Dumañuecos	28
Figura 8: Herramientas empleadas para la preparación	28
Figura 9: A: Instrumentos para la preparación de las muestras para la DRX, B: Portamuestra para análisis de DRX, C: Difractómetro X'Pert ³	29
Figura 10: Diagrama ternario Ca-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ (Calleja 1982; Pérez-González et al. 2019; Pérez-González et al. 2020).....	32
Figura 11: Procedimiento para la evaluación preliminar de las potencialidades de los depósitos arcillosos como fuente de MCS. Fuente: (Almenares Reyes RS et al. 2021).....	34
Figura 12: Clasificación de arcillas de acuerdo a su potencial para la producción de cemento de bajo carbono (Almenares-Reyes 2017)	35

Figura 13: Clasificación química de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos en el sistema ternario $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	37
Figura 14: Valores de pérdida de masa por ignición	38
Figura 15: Contenidos de caolín equivalente	38
Figura 16: Difractograma de la muestra compósito de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos (DM)	41
Figura 17: Clasificación por clases minerales de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos (DM) teniendo en cuenta su efecto potencial en el rendimiento final como MCS	42
Figura 18: Potencialidades de las arcillas de Dumañuecos para la producción de cemento de bajo carbono	43

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Fórmula para el cálculo de la pérdida de masa por deshidroxilación según Almenares (Almenares-Reyes 2017).....	30
Ecuación 2: Fórmula para el cálculo de caolín equivalente según Almenares (Almenares-Reyes 2017)	31

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Requisitos químicos de la norma NC-TS528 del 2013	31
Tabla 2: Criterios límites establecidos (Almenares-Reyes 2017; Almenares Reyes RS et al. 2021)	33
Tabla 3: Composición química de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos	36

INTRODUCCIÓN

Los materiales de construcción han jugado un papel fundamental en el desarrollo de la humanidad, estos han evolucionado para dar solución a nuevas y más complejas problemáticas constructivas. El uso de los cementos calcáreos data de un período muy temprano de la historia de la humanidad y ha alcanzado un desarrollo tan alto en los tiempos modernos que ha dado lugar a una de las industrias de mayor importancia, pero nuestro conocimiento de la naturaleza científica de los materiales y procesos involucrados es aún imperfecto (John y Lothenbach 2023).

El cemento es uno de los materiales más empleados en la actualidad (Alujas 2010; John 2002; Hendriks et al. 2004), llegándose a considerar su consumo uno de los indicadores para evaluar el crecimiento de un país. La producción mundial de cemento crece de manera acelerada, en el año 2002 llegó a las 1.75 10⁹ t, con un crecimiento promedio anual del 3,5 %, medido desde 1970 (Roessler y Stark 2003; Hendriks et al. 2004) y en el 2022 se reportaron 4,100,000 t producidas (Survey 2023).

La obtención de este material es responsable de un alto consumo de materias primas, de portadores energéticos y del 5% al 7% del CO₂ emitido a nivel mundial y del 3% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (Abdelaziz et al. 2023), donde en general, por cada tonelada de cemento producida, se emiten entre 850 y 1100 kg de CO₂ (Balestra et al. 2022). Alrededor del 60% de las emisiones finales de CO₂ asociadas provienen de la descomposición de la calcita constituyente de la piedra caliza: $\text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (Scrivener et al. 2023), durante el proceso de producción del clínquer.

En este contexto, el Acuerdo de París firmado por 195 naciones y la Unión Europea pretende limitar el aumento de la temperatura hasta 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales (Jhatial, Nováková y Gjerløw 2023). El ambicioso objetivo de ser neutros en carbono para 2050 pone de relieve la urgente necesidad de que los materiales de construcción reduzcan drásticamente su huella ambiental (especialmente las emisiones de CO₂) y desarrollen conceptos de circularidad más completos (Scrivener et al. 2023).

Pasar de cementos ricos en OPC a pobres en OPC es un camino irreversible que la industria del cemento está siguiendo y se compromete a seguir adelante (Flatt et al. 2023).

El uso de materiales cementantes suplementarios (MCS) ha crecido en las últimas décadas debido a la necesidad de incrementar la producción de aglomerantes y a la preocupación por el impacto ambiental de la producción de clínquer (Söyek Abay y Tanaçan 2023; Jhatial, Nováková y Gjerløw 2023; Abdelaziz et al. 2023).

Los SCM se refieren a materiales finamente divididos que se agregan al cemento o al concreto para reemplazar el cemento Portland (Sobolev et al. 2018). Estos son un conjunto de materiales que muestran actividad hidráulica o puzolánica, o ambas, y de esta forma mejoran las propiedades de los productos finales del cemento (Almenares-Reyes 2017; RAMOS LARA 2015).

Según su origen se pueden distinguir dos categorías, los materiales de origen natural y los de origen artificial (Papadakis y Tsimas 2002; Martínez de la Cruz 2017; Espinosa Borges et al. 2019; Almenares-Reyes 2017). La segunda categoría está representada por materiales silíceos procedentes de procesos metalúrgicos (Papadakis y Tsimas 2002) y subproductos de procesos industriales (Xargay et al. 2019; Matias, Faria y Torres 2014; Ferrara et al. 2019; Zito, Irassar y Rahhal 2020; Kreiker et al. 2014).

Ante la escasez de MCS clásicos (escorias y cenizas volantes), el material que puede aumentar radicalmente el nivel de sustitución del clínquer y, por tanto, conducir a importantes reducciones de las emisiones de CO₂ es la arcilla calcinada (Scrivener et al. 2023).

El consumo energético y el costo de producción del cemento a base de arcilla caolinítica han sido del 70% y el 45%, respectivamente menores que el OPC (Esubalew Kassa et al. 2022).

Las arcillas son únicas entre los sustitutos del cemento debido a su disponibilidad mundial (Söyek Abay y Tanaçan 2023) y aparecen frecuentemente como desechos de operaciones mineras (Ben Haha et al. 2023).

En los últimos años ha cobrado un gran interés el estudio de los residuos arcillosos para su uso como materiales cementicios suplementarios (Yanguatin et al. 2019; Papakosta et al. 2020; Maier et al. 2020; Arruda Junior, de Sales Braga y Santos Barata 2023; Sgarlata et al. 2022), reduciendo la generación de residuos y conservando los materiales naturales (Alujas Diaz et al. 2022).

En Cuba la activación térmica de arcillas como materiales cementicios suplementarios ha revolucionado la industria de los materiales de la construcción, con un plan de gobierno estructurado para empezar producciones industriales (Fernández Pérez 2019; Redacción Digital 2019; Díaz Álvarez 2014).

La provincia de Las Tunas ha sido líder en el empleo de arcillas calcinadas para satisfacer la elevada demanda de materiales existente en este territorio (Labrador Herrera 2018). Esto ha puesto de relieve la existencia en Dumañuecos de grandes volúmenes de arcillas caoliníticas acumuladas en escombreras con buenas perspectivas para el desarrollo de puzolanas (Espinosa Borges et al. 2019).

Con anterioridad se han estudiado los residuos de caolín del yacimiento Dumañuecos con buenas perspectivas para su empleo como puzolanas (Espinosa Borges et al. 2019), pero sus volúmenes son limitados, sin embargo durante la explotación se generaron residuos arcillosos rojos con mayores volúmenes concentrados en escombreras pero carecen de estudio, por lo que se hace necesario una evaluación de sus potencialidades como base para el desarrollo de materiales cementicios suplementarios.

Problema:

¿ Los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos presentan potencialidades para el desarrollo de materiales cementicios?

Hipótesis:

Si se aplica el procedimiento para la selección preliminar de materiales arcillosos, basado en su composición química y mineralógica, es posible valorar las potencialidades de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos como base preliminar para el desarrollo de materiales cementicios.

Objetivo general:

- Evaluar las potencialidades de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos a partir de su composición química y mineralógica como base para el desarrollo de materiales cementicios

Objetivos Específicos:

- Caracterizar químicamente los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos.
- Caracterizar mineralógicamente los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos mediante difracción de rayos X.
- Determinar el contenido de caolinita equivalente de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos mediante las pérdidas por ignición.

Objeto:

- Los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos.

Campo de acción:

- Las características mineralógicas de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos

Capítulo I: CARACTERÍSTICAS FÍSICO GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1. Situación Geográfica

El yacimiento de caolín Dumañuecos está ubicado (Figura 1) en el poblado de Dumañuecos del municipio de Manatí en la parte septentrional de la provincia Las Tunas, limita al este con el municipio de Puerto Padre, al oeste con la provincia de Camagüey, al sur con el municipio Las Tunas y al norte con el Océano Atlántico.

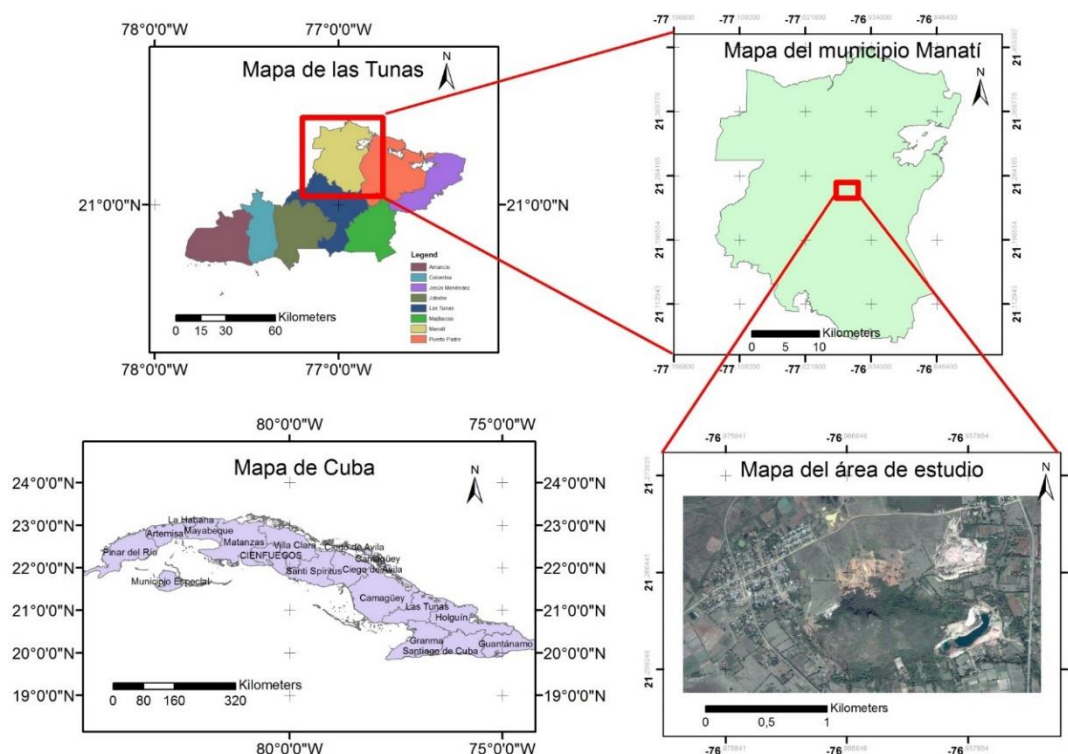


Figura 1: Esquema de ubicación geográfica del yacimiento de caolín Dumañuecos

1.2. Relieve

La región presenta un relieve en forma de llanura abrasiva-denudativa ligeramente diseccionada con cotas que oscilan entre 10 y 40 m, ya en el área costera que bordea la bahía, la llanura es laguno-palustre con cotas entre 5 y 10 m. En la parte periférica exterior de la zona la llanura es abrasiva denudativa, diseccionada con cotas entre 20 y 40 m, al Sur esta llanura está limitada por el peniplano Florida-Camagüey-Tunas (Valdés 1987).

1.3. Red hidrográfica

La red hidrográfica de la región es poco densa y su importancia es muy limitada, está compuesta por los ríos Yarigua, Gramal y Manatí que son de poco caudal y que desembocan en la bahía de Manatí; además del río Cabrerías y los arroyos Venero y Brazo Gramal que corren entre el N y el N-NE (Valdés, 1987)

Las rocas son poco porosas y por lo general, las aguas subterráneas proceden de la infiltración de las precipitaciones atmosféricas que ocurren en la región. El flujo se presenta en varias direcciones, debido a los desniveles del terreno y a las condiciones topográficas. Predomina el flujo desde el parteaguas central hacia la porción Sur y Norte.

La cuenca subterránea Tunas Norte está formada por sedimentos del Cuaternario y rocas del Neógeno que yacen concordantemente sobre las de edad Cretácico. Los principales acuíferos se desarrollan en la formación Vázquez, que almacenan considerables volúmenes de agua subterránea (cuenca La Cana). La dirección del flujo es desde el Sur Sudoeste hacia el Norte (Zamora 2008).

1.4. Características geológicas regionales

Según consulta hecha al informe del levantamiento geológico a escala 1:250000 de la antigua Provincia de Oriente (realizado por la Academia de Ciencias de Cuba) el área perspectiva está enmarcada en la zona estructural Auras y Tunas en menor grado, ambas por la cuenca superpuesta de la margen norte. El límite entre estas dos zonas está determinado por fracturas de carácter regional. En el área a investigar están presentes en general litologías de origen vulcanógeno-sedimentaria, sedimentaria o ígnea. En la región las rocas ígneas están representadas por intrusivos ácidos, granodioritas y dioritas de tipo abisales.

1.4.1. Estratigrafía regional

La estratigrafía regional de las rocas está representada por formaciones que van desde el Cretácico Inferior hasta el Cuaternario.

Formación Caobilla: Secuencia vulcanógena donde predominan las variedades ácidas (dacitas, riolitas y riolitas). Ocasionalmente entre las dacitas se

encuentran traquidacitas. Las variedades medias incluyen andesitas de amplia difusión lateral y vertical, pero son poco significativas de acuerdo al volumen de la unidad. Tobas aglomeráticas de composición andesito- dacítica y calizas de grano medio. Yace discordantemente sobre las formaciones Vidot y Zurrupandilla y las ultramafitas. Es cubierta discordantemente por las formaciones Durán, Florida, Güines, Maraguán, Nuevitas, Paso Real, Presa Jimaguayú, Saramaguacán, Vázquez, Vertientes y el olistostroma Taguasco.

Formación Jaimanitas: Calizas biotriticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas conteniendo principalmente conchas bien preservadas y corales de especies actuales y ocasionalmente biohermos. Las bolsas cársicas se encuentran rellenas por una fina mezcla carbonato- arcillosa ferruginosa de color rojo ladrillo. Pasan a calcarenitas masivas o finamente estratificadas y a veces contienen intercalaciones de margas. La cementación es variable. La coloración predominante es blancuzca o amarillenta. Yace discordantemente sobre las formaciones Cayo Piedras, Grande, Güines, Júcaro, Río Maya, Mícaro, Vázquez, Vedado, calciruditas Feliz y el Gr. Remedios. Es cubierta discordantemente por las formaciones Playa Santa Fé, por los depósitos del Holoceno y depósitos innominados del Cuaternario.

Formación La Sierra: Lavas y lavobrechas, fluidales, riolíticas, riodacíticas y dacíticas. Corta a las formaciones Camujiro y Piragua. Es cubierta discordantemente por las formaciones Durán y Presa Jimaguayú.

Formación Vázquez: Alternancia de margas, aleurolitas calcáreas o arcillosas, argilitas y arcillas esmécticas, arcillas arenáceas, que en la parte occidental del área de distribución contienen intercalaciones finas y concreciones de magnesita, la cual puede presentarse también en estratos de 5 m y más, subordinadamente calizas biotriticas arcillosas, calizas micriticas, calcilutitas poco consolidadas (éstas a veces con débil fosfatización), calcarenitas, areniscas, pseudoconglomerados, conglomerados calcáreos y polimícticos, constituidos estos por serpentinitas, gabros, cuarzo, vulcanitas y granitoides. Algunos horizontes son muy ricos en macrofósiles, principalmente moldes e impresiones de bivalvos siendo conspicuos en las arcillas los Ostreidae, principalmente Ostrea Rugifera. Ellas contienen también yeso, piritita y lignito. Colores variados: crema, amarillento, grisáceo, verdoso, rojizo y blancuzco,

predominando el primero. Estratificación enmarcada, en general, por los cambios litológicos. Yace discordantemente sobre las formaciones Caobilla, Iberia, Saramaguacán, el Gr. Remedios, olistostroma Haticos y las ultramafitas. Es cubierta discordantemente por la formación Jaimanitas y la cobertura aluvial.

1.4.2. Tectónica

Según la división de las zonas estructuro faciales del área de Cuba Oriental el sector investigado se encuentra en los alrededores de la zona Tunas y próximo al contacto con la zona Auras que se extiende al noreste de la misma (Hevia Delgado y ONRM 1983). El contacto entre dichas zonas se prevé tectónico con una falla o sistema de fallas profundas con una relación laterales-transgrecionales y continua desde Manatí hasta San Andrés.

En la zona Tunas la dirección general de la estructura principal es NE-SO; con la misma coinciden el rumbo de la formación Buena Ventura y los pliegues lineales suaves presentes. Dicha zona pertenece a la megafacie precubana al Megasinclinar de las Antillas, mientras que la zona Auras pertenece al Melange de Holguín (Hevia Delgado 1983).

1.4.3. Geomorfología regional

La zona estudiada está situada en la pendiente oriental del Cerro de Dumañuecos (Figura 2), cuya altura es de 128 m sobre el nivel del mar, siendo el mismo el punto más elevado de la región. En los alrededores del mismo, el terreno es casi llano, o poco ondulado. La altura promedio de la superficie del área de estudio varía desde 22-35 m sobre el nivel medio del mar hasta 128 m que es la altura máxima de la región (Hevia Delgado 1983) Según la división geomorfológica, (Colectivo de Autores 1978) la zona de estudio y sus alrededores, pertenece a las llanuras marinas abrasivo-denudativa, ligeramente diseccionadas con alturas entre 10-20 m abrasivas y abrasivo-denudativas, diseccionadas de alturas entre 20-80 m, las cuales corresponden a los macizos alpinos medios de alturas menores a 500 m.



Figura 2: Cantera del yacimiento Dumañuecos

1.4.4. Características del vulcanismo regional

La actividad volcánica de la región Ciego de Ávila-Camagüey-Las Tunas está representada por las rocas de la asociación vulcano-plutónica calcoalcalina de arco de islas, de edad Albiense -Campaniense medio (Iturralde-Vinent 1998)(Iturralde-Vinent 1994), representa el desarrollo de una secuencia alcalino sódica-potásica (Talavera Coronel, F; Echevarria, B; Tchounev, D; Ianev, S; Tzankov 1986). La parte inferior representa la etapa inicial de desarrollo del arco y está caracterizada por la efusión de lavas básicas y medio-básicas con tendencia subalcalina (Echevarria y Talavera Coronel, F; Tchounev, D; Ianev, S; Tzankov 1986).

1.5. Geología del área de estudio

Las rocas del yacimiento Dumañuecos pertenecen a las series inferiores y superiores del arco volcánico del Aptiano-Campaniano, las cuales están representadas por el complejo de las rocas efusivas de composición intermedia y básica (Hevia Delgado 1983). Una característica típica de esta región es la presencia de intrusiones ácidas de granitos (Martín Cortés, Guillermo Ruperto; Theodoro Hennies, Wildor; Valenzuela Díaz 2005). En los alrededores de las rocas intrusivas se observan formaciones sedimentarias y vulcanógeno-sedimentarias del Mioceno (Brace et al. 1996).

En esta área se desarrolla la Formación Caobilla (Figura 3), que está constituida por una secuencia vulcanógeno – sedimentaria donde predominan las variedades ácidas (dacita, riodacita y riolita) calcoalcalinas, las variedades medias incluyen andesitas (Batista 2011)(Furrazola Bermúdez et al. 2013). Las rocas de esta unidad varían desde andesíticas hasta riolíticas con pocos representantes más básicos y predominio de las dacitas (Milian et al. 2001). Mediante el análisis petrográfico se constata la presencia de cuarzo, feldespatos y turmalinas, así como, el predominio de texturas granoblástica y la cataclástica (Espinosa-Borges et al. 2022).

Como regla presenta intensa alteración hidrotermal-metasomática, sinvolcánica y vinculada al contacto del intrusivo (Iturralde Vinent 1996). Durante los años de explotación se demostró que se trata de una faja de riolitas alteradas por soluciones hidrotermales (Haslar 1971). La paragénesis de caolinita + cuarzo + alunita + zunyita + turmalina + pirita + hematita indica el desarrollo de una alteración argílica avanzada (Espinosa-Borges et al. 2022).

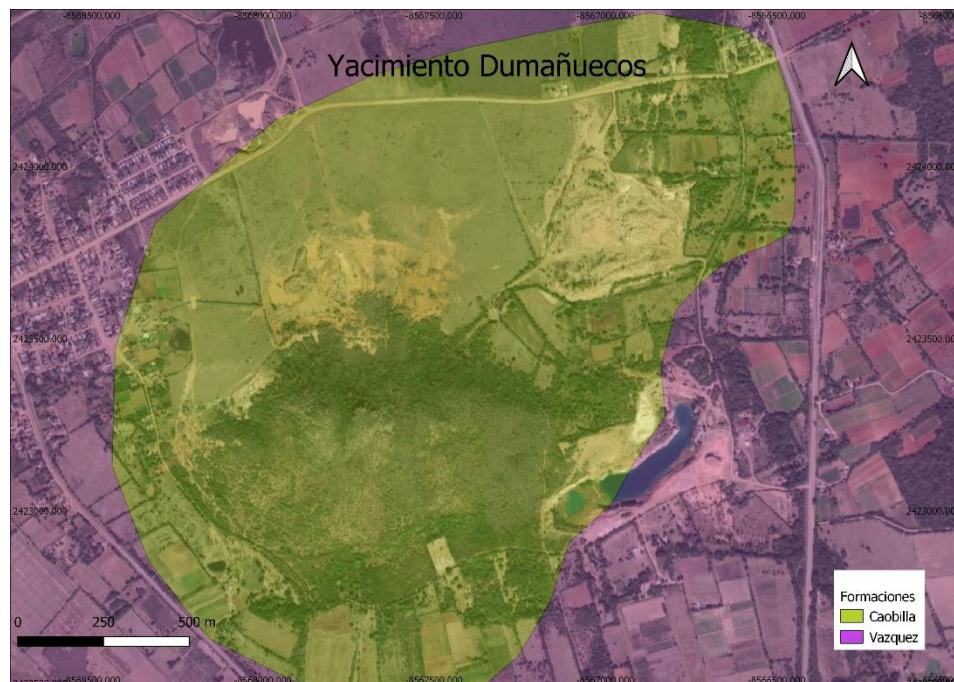


Figura 3: Mapa geológico del yacimiento Dumañuecos (modificado a partir del mapa geológico del IGP escala 1:100000 del año 2017)

1.5.1. Génesis del yacimiento Dumañuecos

El yacimiento de caolín Dumañuecos se ha formado por transformaciones de riolitas y parcialmente por las transformaciones de rocas tipo andesitas y tobas. La transformación de riolita en caolín fue causada por procesos post-magmáticos (Hevia Delgado 1983). La meteorización ha originado arcillas coloreadas (presencia de hematita y anatasa), pero no ha sido tan intensa como para eliminar de dichas arcillas su contenido de hierro. El origen del cuerpo de caolín no se puede aclarar por la influencia de factores climáticos, ya que sus partes más profundas se encuentran entre riolitas firmes cuarcificadas en profundidad a varias decenas de metros.

Por la forma de los cuerpos minerales (Figura 4), se trata de una antigua estructura volcánica con zonas tectónicas anulares, posiblemente una caldera (Escobar Loret de Mola 2018). Sin embargo, por las características de la estructura y la textura porfídica de la roca original, se puede clasificar como un domo subvolcánico riolítico.

El caolín del yacimiento Dumañuecos es primario, porque se observa en muchos casos la estructura de la roca primaria, los fragmentos de cuarzo, restos de rocas más o menos caolinitizadas y otros minerales de forma angular o subangular, lo que documenta que el material no ha sufrido ningún tipo de transporte, es decir, se encuentra in situ (Hevia Delgado 1983).

El proceso hidrotermal favoreció la transición a sanidina, como feldespato predominante dentro de la solución de feldespatos alcalinos, probablemente por reacciones de cambio de base, con variaciones de temperatura y pH que propiciaron la formación de alunita en primera instancia y jarosita y yeso en las zonas más supergénicas, con una importante cantidad de agua que favoreció la formación de pirofilita. Es un yacimiento primario, específicamente del tipo epitermal de baja sulfuración (González Jiménez, Pérez García y Espinosa Borges 2022).

La participación de los factores climáticos no se puede eliminar, específicamente en el período posterior (Hevia Delgado 1983). La ilitización acompaña a la formación de las arcillas atribuible a la meteorización de los feldespatos primarios

o a la propia alteración térmica de estos (González Jiménez, Pérez García y Espinosa Borges 2022).

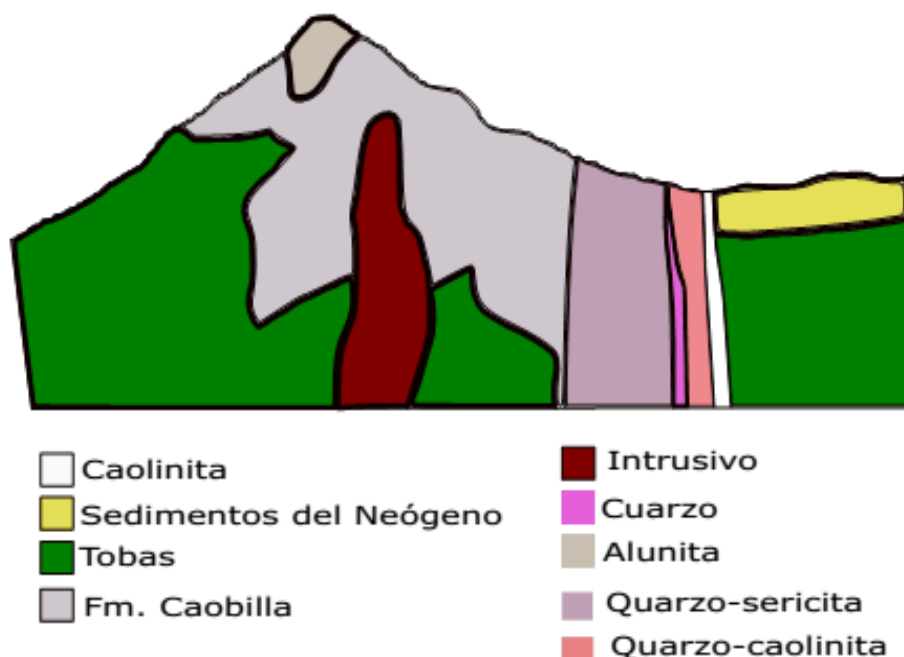


Figura 4: Perfil esquemático del yacimiento Dumañuecos modificado de Escobar Loret de Mola 2018b (González Jiménez, Pérez García y Espinosa Borges 2022)

1.5.2. Composición química

El contenido de SiO_2 oscila de 39,04% hasta 70,68%, en su mayoría se encuentra entre 40 hasta 50%. Los contenidos de alúmina oscilan entre 13,9 hasta 33,1%. El contenido de Fe_2O_3 oscila entre 1,99 hasta 20,32% predominando los valores superiores al 10%. Las arcillas del suprayacente poseen una composición química muy variable (Hevia Delgado 1983).

1.5.3. Composición mineralógica

Las arcillas están constituidas principalmente por el mineral caolinita, aunque su gran variabilidad química nos indica la presencia de otros minerales que están menos distribuidos. Por ejemplo, la presencia de sulfato indica la presencia de azufre; el elevado contenido de trióxido de hierro indica la presencia de minerales ferrosos; el elevado contenido de sodio indica la presencia de montmorillonita y de potasio la presencia de illita.

En el corte vertical del yacimiento se puede observar la transición gradual desde el caolín, que constituye la materia prima, a rocas fuertemente caolinitizadas que

aún conservan relictos de la estructura primaria y posteriormente aparecen rocas cuarzo-sericíticas-caoliníticas desarrolladas en vulcanitas ácidas o vulcanitas con fuertes procesos de cuarcificación, sericitización y caolinitización acompañados por mineralización diseminada de sulfuros constituyendo una típica paragénesis hidrotermal. En estas rocas fueron encontradas también zungita y alunita, dos minerales típicos de condiciones hidrotermales de temperatura media y profundidades menores (Hevia Delgado 1983).

1.6. Materiales de escombreo del yacimiento Dumañuecos

1.6.1. Características del material estéril del yacimiento Dumañuecos

Las rocas estériles están representadas por arcillas, con mayores dimensiones verticales y horizontales en el cuerpo 2 que en el 1. Las propiedades cualitativas de las arcillas son variables, se trata de arcillas no refractarias y plásticas; con alto potencial para su uso en la Industria de Cerámica Roja. No se plantearon en el proyecto de explotación, variantes para el aprovechamiento de las arcillas residuales de la explotación y la cubierta del destape (Fernández Rodríguez 1990).

1.6.2. Volúmenes de extracción de estériles durante la explotación minera del yacimiento Dumañuecos

El proceso de explotación se realizó con una cubierta estéril y materia prima máxima de 2 m³/t. La cubierta estéril permisible fue de 20 m de potencia. Durante la confección del proyecto de explotación se previó la extracción de 641240 m³ para una relación de material útil estéril de 1:1.84. En el 1er año de explotación se concentraron los mayores volúmenes de producción de estériles, asociados a la extracción de 446670 m³ de material estéril relacionado con la etapa minera de preparación. Además, de 25650 m³ de estéril producido por el avance de los frentes de extracción (Fernández Rodríguez 1990).

1.6.3. Características de las escombreras del yacimiento Dumañuecos

Durante el periodo de destape se separó la capa vegetal del resto del material estéril y se almacenó en un lugar independiente para su posterior utilización. Se utilizó un área de escombreo de 107730 m², con altura promedios de 6 m. El volumen de escombro proyectado fue de 646680 m³. La cota en la que se ubicó el piso de la escombrera es el de +30 m con un ángulo del talud de 35°. Las

escombreras se ubicaron en la zona Sur y Norte del yacimiento (Fernández Rodríguez 1990).

1.7. Conclusiones parciales

El yacimiento Dumañuecos constituye un depósito de arcillas caoliníticas de alta pureza que fue sometido a un intenso proceso de explotación lo que ha permitido la existencia de grandes volúmenes de arcillas acumuladas en tres sistemas de escombreras con marcadas diferencias

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se describen los materiales y métodos utilizados para la realización de esta investigación (Figura 5), la misma estuvo dividida en cuatro etapas fundamentales. En la primera etapa se realiza una revisión bibliográfica de todos los materiales recopilados, que guardan relación con la investigación. La segunda etapa se dedica a la documentación y la selección de muestras para analizar. En la tercera etapa se seleccionaron y prepararon las muestras para realizar los ensayos de laboratorio. Por último, se procede al análisis y discusión de los resultados.

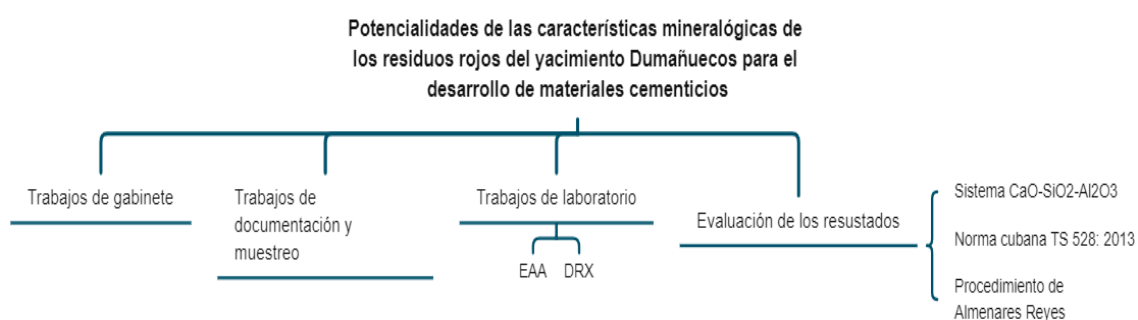


Figura 5: Flujograma de la investigación

2.2. Trabajos de documentación y muestreos

La revisión bibliográfica previa permitió establecer que el depósito es conocido por haber tenido en su momento las reservas de mayor calidad de caolín del país (Ariosa Iznaga 1984). Este yacimiento sufrió una intensa explotación en décadas pasadas lo que generó inmensas escombreras que poseen reservas de arcillas caoliníticas considerables. Actualmente se extrae de las escombreras pequeños volúmenes para la producción de ladrillos por parte de la Empresa de Materiales de Construcción de las Tunas. Los pobladores de la zona usan también las escombreras para la producción artesanal de ladrillos.

Durante los trabajos de reconocimiento se constató que existen tres tipos de materiales de residuo con marcadas diferencias macroscópicas en función de su coloración Figura 6. Un primer tipo tecnológico representado por arcillas caoliníticas blancas descartadas por la presencia de elementos nocivos (sulfuros). Un segundo residuo compuesto por arcillas rojas multicomponentes con baja ley de caolín y por último los materiales de destape con una coloración

marrón. Todos estos residuos se depositaron en sistemas de escombreo diferentes, lo que permite su estudio diferenciado.



Figura 6: Materiales arcillosos residuales de la explotación del yacimiento de caolín Dumañuecos, A: arcillas caoliníticas blancas; B: residuos arcillosos rojos; C: materiales arcillosos de la zona de destape

Para este trabajo fueron de interés los residuos arcillosos rojos de baja ley de caolín (Figura 7) por los elevados volúmenes que estos presentan. El criterio de muestreo no se rige por regularidades geológicas dado la naturaleza antrópica de las escombreras. Se tomaron muestras puntuales y a partir de estas se prepararon muestras compósito de diferentes escombreras, previendo el desarrollo local futuro que pudieran generar.



Figura 7: Escombrera de residuos arcillosos rojos de la explotación del yacimiento Dumañuecos

2.4. Trabajos de laboratorio

2.4.1. Preparación

El primer paso durante los trabajos de laboratorio fue la preparación (Figura 8) de las muestras. Las muestras fueron sometidas a un proceso de selección y generación de muestras compósito. Para garantizar la homogeneidad de las muestras se realizó un proceso de cuarteo manual.

Estas muestras fueron sometidas a un proceso de secado para eliminar la humedad natural del material. El secado se efectuó en un horno, fijando la temperatura de secado de las muestras a 110°C por un período de tiempo de 1 h. Al concluir el ciclo de secado se extrajeron las muestras del horno con la ayuda de pinzas especiales. Inmediatamente se colocaron en una desecadora de vidrio con óxido de sílice, para eliminar posibles errores durante la investigación, por la hidratación del material con la humedad atmosférica. El enfriamiento del material se realizó dentro de la desecadora por un periodo de 30 min.



Figura 8: Herramientas empleadas para la preparación

2.4.2. Análisis mineralógico mediante difracción de rayos X

Las mediciones se realizaron mediante Difracción de Rayos X (DRX) con un Difractómetro X'Pert³ Powder de Panalytical (Figura 9) utilizando radiación CuK α y rejilla de divergencia de 0,5 °. Las muestras se analizaron entre 5 y 80 ° (2 θ),

con paso angular desde 0,008 °, tiempo por paso de 30 segundos, y sin filtro de níquel Ni.

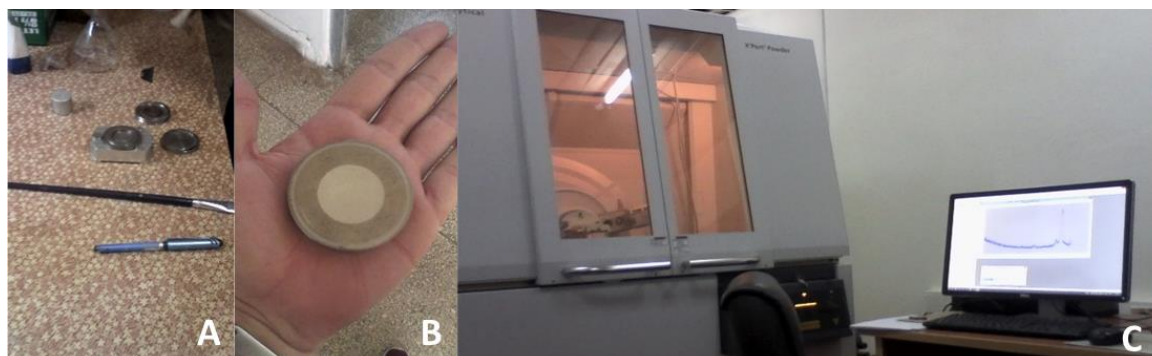


Figura 9: A: Instrumentos para la preparación de las muestras para la DRX, B: Portamuestra para análisis de DRX, C: Difractómetro X'Pert³.

Los difractogramas se procesaron con el software X Pert HighScore Plus (2011). Se aplicó la rutina de refinamiento por Rietveld para desarrollar el análisis semicuantitativo de las fases presentes en las muestras.

2.4.3. Determinación del contenido de caolinita equivalente

Para determinar el contenido de caolinita equivalente se empleó una mufla según el método propuesto por Almenares y colaboradores (Almenares-Reyes 2017). El método se basa en la medición de las pérdidas por ignición entre 350 °C y 850 °C (Ecuación 1), que es el intervalo de temperatura en el que ocurre más del 95 % de la deshidroxilación de los minerales del grupo de la caolinita (Ecuación 2). El contenido de minerales arcillosos se expresó como contenido de caolín equivalente (K^E) respecto a la masa de la muestra a 200 °C. Como el intervalo de temperatura puede variar en dependencia de la naturaleza de la muestra y debe valorarse de manera particular en dependencia del tipo de material evaluados, se evaluaron varios intervalos de temperatura. En este caso el procedimiento seguido se presenta a continuación: :

1. Se tomaron 100 g de muestra pulverizada y se colocó en un crisol de porcelana sin tapa, previamente pesada. El crisol debe estar libre de impurezas volátiles y debe ser capaz de resistir hasta 1000°C. El material no debe ocupar más de 2/3 de la altura de la cápsula.

2. Se introdujo el crisol en una mufla y se calentó hasta 200°C durante una hora. Se extrajo y se colocó inmediatamente en una desecadora de vidrio hasta que alcanzó la temperatura ambiente, de forma que se evite que la muestra absorba humedad durante el proceso de enfriamiento. Este proceso debe durar alrededor de 30 minutos. Luego se determinó la masa de la muestra, al sustraer la masa correspondiente a la cápsula y se registró el valor obtenido como m (200°C).
3. El crisol se introdujo nuevamente en la mufla y se calentó hasta 350°C durante una hora. Luego de calentadas a esa temperatura se aplicó el mismo procedimiento que se aplicó en el paso anterior. El valor obtenido se registró como m (350°C).
4. Luego se introdujo en la estufa y se calentó hasta 750°C durante una hora. Se aplicó el mismo procedimiento para enfriar la muestra y determinar su masa. Este valor se registró como m (750°C).
5. Por último, se introdujo en la estufa y se calienta hasta 800°C durante una hora. Se aplicó el mismo procedimiento para enfriar la muestra y determinar su masa. Este valor se registró como m (800°C).
6. Por último, se introdujo en la estufa y se calienta hasta 850°C durante una hora. Se aplicó el mismo procedimiento para enfriar la muestra y determinar su masa. Este valor se registró como m (850°C).

Para una mayor confiabilidad de los resultados de este ensayo se realizaron 3 réplicas y se utilizó una balanza semi-analítica con una precisión de ± 1 mg. Además, se emplearon herramientas de laboratorio para una manipulación de las muestras.

Las expresiones matemáticas utilizadas para este cálculo se reporta en las ecuaciones que se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde 13,96 es el contenido teórico (% en masa) de grupos hidroxilos estructurales asociados a la capa octaédrica de la caolinita pura.

Ecuación 1: Fórmula para el cálculo de las pérdida de masa por deshidroxilación según Almenares (Almenares-Reyes 2017)

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

Ecuación 2: Fórmula para el cálculo de caolín equivalente según Almenares (Almenares-Reyes 2017)

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

2.4.4. Espectrometría de Absorción Atómica

La muestra se descompuso mediante la fusión con un fundente (bórax, metaborato de litio o mezcla de metaborato de litio con tetraborato de litio 1:1). El fundido se lixivió con ácido clorhídrico al 15 % y gotas de peróxido de hidrógeno al 30 % y se llevó a un volumen final de 250 mL.

La medición se realizó en un Espectrómetro Absorción Atómica empleando soluciones de calibración con simulación de las matrices y una correcta dilución de la muestra.

Se empleó la norma **NC-TS528 del 2013** (Tabla 1) para evaluar según sus contenidos químicos como aditivos minerales para el cemento.

Tabla 1: Requisitos químicos de la norma NC-TS528 del 2013

	Clase de aditivo mineral		
	N	F	C
Dióxido de Silicio (SiO ₂) más Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃) más Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃), mín. %	70,0	70,0	50,0
Trióxido de Azufre (SO ₃), máx. %	4,0	5,0	5,0
Contenido de Humedad, máx. %	3,0	3,0	3,0
Pérdidas por Ignición, máx. %	10,0 ^a	6,0 ^b	6,0
^a Para el caso de puzolanas naturales que contengan en su composición mineralógica contenidos de zeolitas se excluye este requisito, tal es el caso de las tobas zeolitizadas que se emplean como puzolanas y que han demostrado una buena actividad tanto con el cemento como con la cal. ^b El uso de puzolana clase F que contiene una pérdida por ignición mayor que 12,0 % pueden ser aprobadas por el consumidor si los reportes de			

cumplimiento de aceptación o los resultados de los ensayos de laboratorio la hacen utilizable.

Los componentes principales de las arcillas están representados por el contenido de CaO - SiO_2 - Al_2O_3 , por lo que se empleó el diagrama triangular (Figura 10) (C-S-A) de Rankin para valorarlas, según su composición, la relación con materiales para cemento, como MCS, las puzolanas, escorias y el cemento portland.

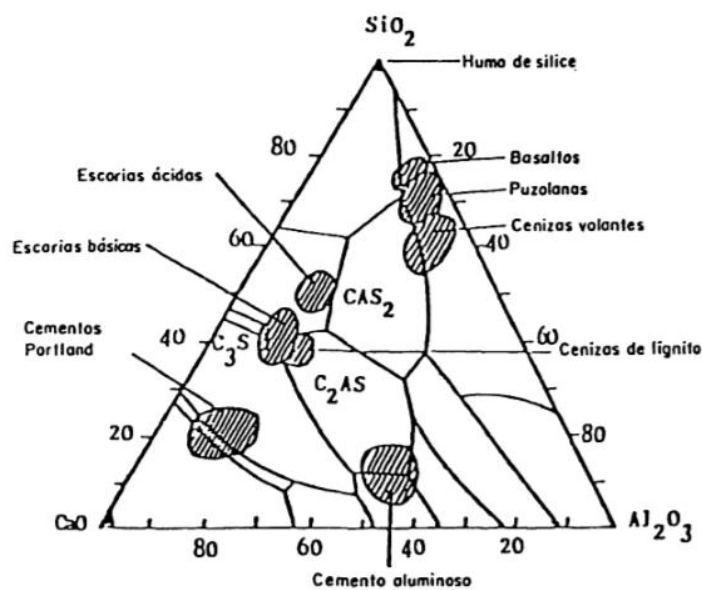


Figura 10: Diagrama ternario $\text{Ca-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Calleja 1982; Pérez-González et al. 2019; Pérez-González et al. 2020)

2.4.4. Metodología de evaluación preliminar de materiales arcillosos como fuentes de SCM

Se emplearon los criterios químicos establecidos por Almenares et al. (Almenares Reyes RS et al. 2021; Almenares-Reyes 2017) para considerar los valores límites permisibles de la composición de las arcillas caoliníticas para la obtención de materiales cementicios suplementarios (Tabla 2). El procedimiento se presenta de forma esquemática en la Figura 11.

Tabla 2: Criterios límites establecidos (Almenares-Reyes 2017; Almenares Reyes RS et al. 2021)

Criterios límites	
Al₂O₃	>18,0 %
CaO	<3,0 %
SO₃	<2,0 %
Al₂O₃/SiO₂	>0,3 %
PPI	>7,0 %

El procedimiento de evaluación preliminar está basado en el contenido de caolinita equivalente en el material arcilloso, pues es el mineral con mayor reactividad en comparación otros minerales arcillosos (Fernandez, Martirena y Scrivener 2011; He, Osbaeck y Makovicky 1995) y que a su vez correlaciona con la resistencia a la compresión de los sistemas binarios y ternarios donde se mezclan (Avet et al. 2016; Almenares Reyes et al. 2018). El procedimiento para la selección de este tipo de material basado en criterios químicos y mineralógicos (Almenares 2017; Almenares Reyes RS et al. 2021). y los criterios de selección preliminares se resumen en la tabla 2.1.

Para este estudio se empleó el procedimiento modificado que se presenta en la Figura 11 el cual permite un aprovechamiento de todo el potencial del material para otras aplicaciones.

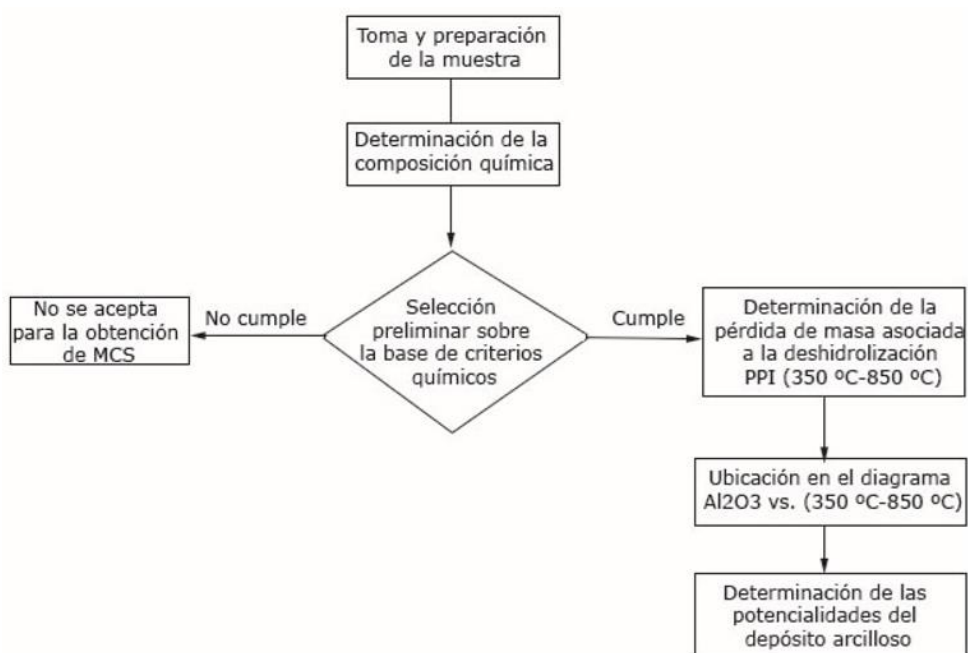


Figura 11: Procedimiento para la evaluación preliminar de las potencialidades de los depósitos arcillosos como fuente de MCS. Fuente: (Almenares Reyes RS et al. 2021)

Teniendo en cuenta las características de la muestra en función del contenido de minerales arcillosos, el gráfico PPI (350-850 °C) vs. Al_2O_3 puede dividirse en cuatro zonas o regiones.

La región I incluye aquellas arcillas con relativamente altos contenidos de minerales arcillosos del grupo de la caolinita ($\text{KE} > 60 \%$), y por tanto, excelentes potencialidades de ser utilizadas como fuente de MCS.

La región II enmarca aquellas arcillas con contenidos apresiiables de minerales del grupo de la caolinita, expresados como KE, entre 40 y 60 %.

La zona III del diagrama se refiere a aquellas arcillas con bajos contenidos de caolinita ($\text{KE} < 40 \%$), pero con contenidos relativamente altos de arcillas de tipo 2:1.

La zona IV del diagrama incluye aquellas arcillas con variables contenidos de minerales arcillosos pero con contenidos apreciables de otros minerales no arcillosos que se descomponen en el mismo intervalo de temperatura, fundamentalmente carbonatos, sulfatos y sulfuros (Figura 12).

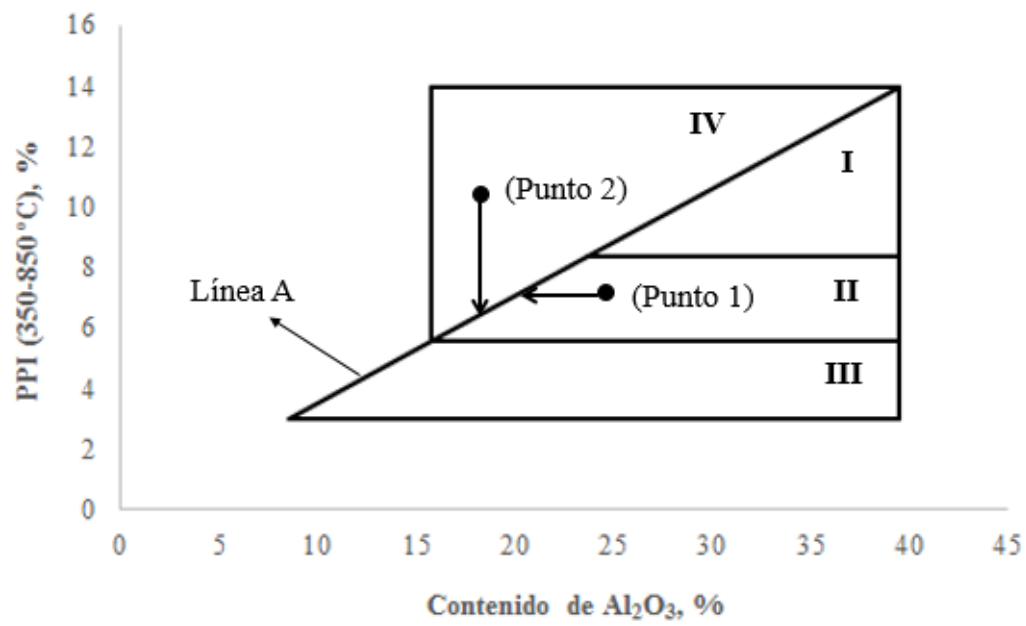


Figura 12: Clasificación de arcillas de acuerdo a su potencial para la producción de cemento de bajo carbono (Almenares-Reyes 2017)

CAPÍTULO III - RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Características geoquímicas de los residuos rojos arcillosos de Dumañuecos

El análisis de los resultados geoquímicos permitió establecer que en los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos predomina la SiO_2 en su composición (Tabla 3), esto está estrechamente relacionado con la composición primaria de las rocas madres (Escobar Loret de Mola 2018b; Espinosa-Borges et al. 2022) a partir de las que se formaron estas arcillas. El contenido de Al_2O_3 es alto, esto está explicado por la abundancia de fases arcillosas y la presencia de micas. Sobresale la presencia de elevadas concentraciones de Fe_2O_3 , esto puede generar problemas de pigmentación a los productos generados con estas arcillas por las propiedades cromóforas del Fe_2O_3 .

Según los criterios límites establecidos estas arcillas cumplen con la relación $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ con un 0,3 % y con bajos contenidos en CaO por debajo de 3 %. Los contenidos de Al_2O_3 quedan por debajo del límite establecido. Por los contenidos de $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ según la norma cubana TS 528: 2013 (NC TS 528:2013 2013) los residuos arcillosos rojos de Dumañuecos (DM) se pueden considerar como aditivos minerales de tipo N o F con más de un 70%.

Tabla 3: Composición química de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos

CÓDIGO	Fe_2O_3	MgO	CaO	Al_2O_3	SiO_2	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3$
DM	15,26	1,52	1,0	15,29	49,93	0,3	80,48
Almenares Reyes, 2017	-	-	<3,0	>18,0	-	>0,3	-
NC-TS528	-	-	-	-	-	-	70

Según las concentraciones de $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ en función del diagrama triangular (Figura 13) para la clasificación química de los materiales cementicios suplementarios se constató que los residuos arcillosos rojos de Dumañuecos presentan una composición semejante a las puzolanas naturales, lo que está en consonancia con la norma cubana TS 528: 2013 donde los aditivos minerales tipo N corresponden a puzolanas naturales.

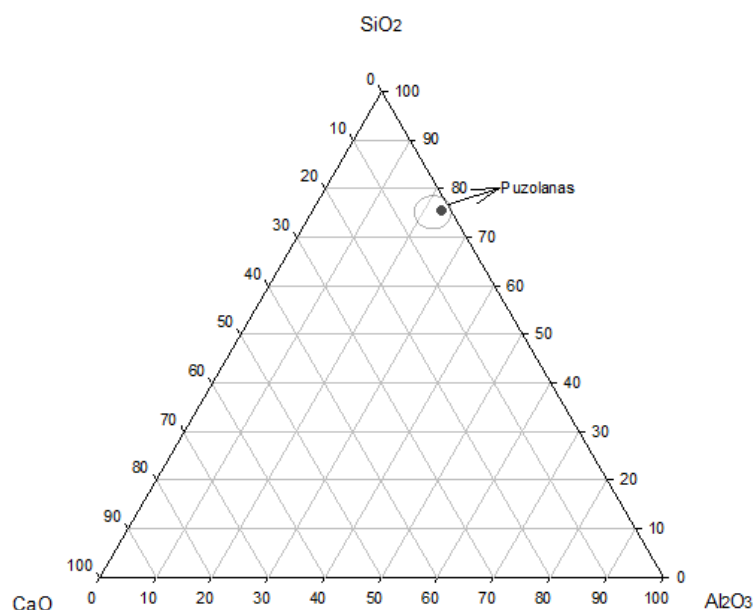


Figura 13: Clasificación química de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos en el sistema ternario CaO-SiO₂-Al₂O₃

3.2. Comportamiento de las pérdidas por ignición y el caolín equivalente de los residuos rojos arcillosos de Dumañuecos

Aplicando el análisis térmico en las muestras de arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos, se calcularon los valores de pérdida de masa por ignición. El valor de pérdida de masa por ignición más elevada fue de 9 %, registrada a los 850°C en todas las muestras. Se constató que en las muestras estudiadas las variaciones sobre los 750°C fueron mínimas, por lo que se considera esta la temperatura óptima de activación. Estos valores de pérdida de masa por ignición evidencia la presencia de numerosos minerales térmicamente inestables en la ventana térmica de 350 a 850°C, relacionados en este material con la presencia arcillas y oxi-hidróxidos pues no está en correspondencia con la composición química, particularmente con el contenido de aluminio (Figura 14).

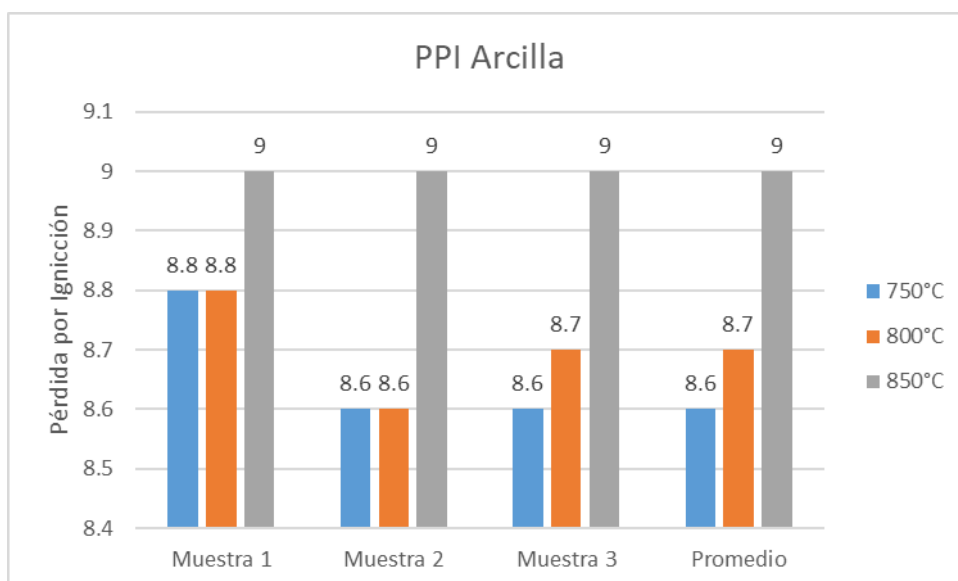


Figura 14: Valores de pérdida de masa por ignición

Luego de definir los valores de pérdida de masa por ignición se determinaron los contenidos de caolín equivalente presentes en las muestras estudiadas. El mayor contenido de caolín equivalente fue de 64,5 registrado a 850°C (Figura 15). Las variaciones en el contenido de caolín equivalente son mínimas en la ventana de activación de 750-850°C lo que indica que los minerales del grupo del caolín sufrieron un fuerte proceso de deshidroxilación hasta los 750°C.

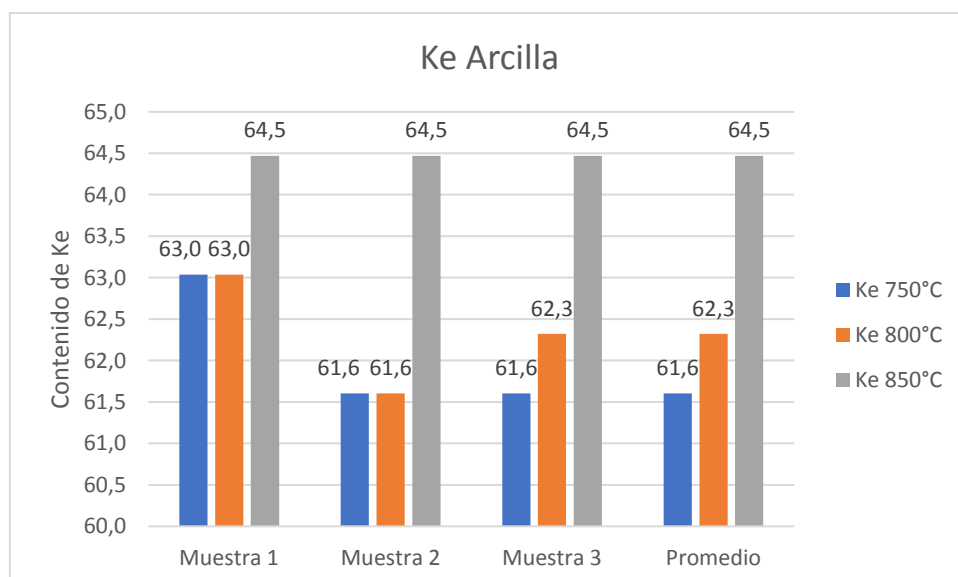


Figura 15: Contenidos de caolín equivalente

3.3. Características mineralógicas de los residuos rojos arcillosos de Dumañuecos

Mediante los análisis de DRX se determinaron las fases minerales presentes en los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos. Sobresale la presencia de fases minerales del grupo de la caolinita, con reflejos fuertes entre los 7,11 y 7,19 angstroms, se determinaron picos específicos para caolinita a los 4,13 y 3,58 angstroms y 4,36 y 4,13 para la nacrita (Figura 16).

El análisis semicuantitativo arrojó que estos residuos están constituidos por más de un 60 % de minerales del grupo de la caolinita, lo cual está en correspondencia con los valores de caolín equivalente determinado mediante pérdidas por ignición. También se detecta cuarzo, en contenidos que están en correspondencia con la génesis del depósito. En menor medida se registró la presencia de moscovita, que también se detectan en este tipo de ambiente de formación.

Los óxidos de hierro se encuentran en más de un 7% representados principalmente por goethita que se forma por la oxidación de los minerales de hierro como producto de la meteorización típica en lateritas y en filones como sombreros de hierro y en menor medida hematita de meteorización de rocas con hierro, la presencia de estos es la responsable de la coloración rojiza de este material (Velde 1995).

Además, se reportó la presencia de diásporo que es un mineral típico en las alteraciones hidrotermales de tipo ácida subsaturado en síliceo (Velde 1995). Por otra parte, si además ha sufrido un proceso de meteorización posterior es común ver este tipo de mineral como producto de la transformación de las rocas en caolinita (Velde 1995) y eventualmente estos minerales arcillosos se vuelven inestables en condiciones de intenso drenaje propiciando la formación de oxihidróxidos de Fe y Al (Galán 2006).

Este yacimiento tiene una génesis conocida por procesos hidrotermales (Cortés et al. 2004; ONRM 1985; Escobar Loret de Mola 2018a; HEVIA DELGADO 1983; Brace et al. 1996; Fernández Rodríguez 1990); sin embargo, por la mineralogía desarrollada en el material estudiado pone de relieve que los procesos de intemperismo actuaron en la zona generando una corteza de meteorización de

composición caolinítica sobre el depósito hidrotermal, confirmando el reporte de otros autores de la acción de los agentes atmosféricos en la generación de las arcillas (Hevia Delgado 1983; González Jiménez, Pérez García y Espinosa Borges 2022). La ausencia de feldespatos indica que la meteorización fue completa generando caolinita de origen supergénico por la alteración de los silicatos de aluminio (feldespatos).

Este tipo de fenómenos se ha reportado con anterioridad en yacimientos de caolín en España donde se ha documentado la caolinización meteórica hasta en los yacimientos hidrotermales más puros (GALÁN HUERTOS y MARTIN VIVALDI 1973). Este proceso ha llegado en algunos casos a ser tan intenso que el caolín residual producido ha podido enmascarar al proceso hidrotermal, aprovechando la zona fracturada y caolinizada por los fluidos ascendentes (GALAN HUERTOS y MARTIN VIVALDI 1975; GALÁN HUERTOS y MARTIN VIVALDI 1973).

Se ha reportado la acción tectónica dentro del yacimiento Dumañuecos propiciando su dinamometamorfismo reflejada en la cataclastización de estas rocas (Espinosa-Borges et al. 2022), por donde pudieron percolar las aguas meteóricas.

Estas arcillas se formaron a partir de riolitas bajo condiciones climáticas ecuatoriales donde es típico el desarrollo de suelos que contiene caolinita y óxidos (Velde 1995)

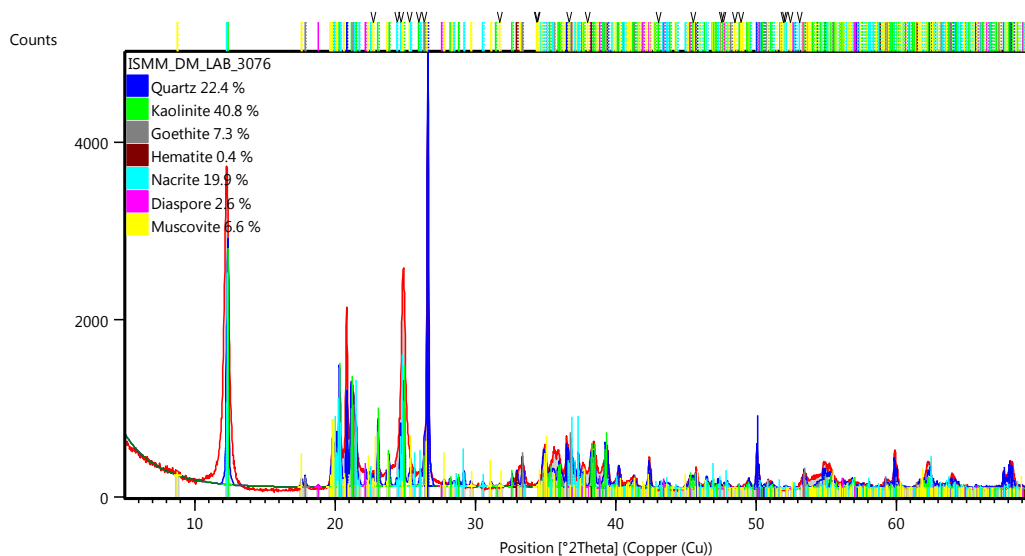


Figura 16: Difractograma de la muestra compósito de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos (DM)

Los minerales identificados se agrupan por clases (Figura 17), teniendo en cuenta su efecto potencial en el rendimiento final de las arcillas calcinadas como MCS, se identificó el predominio de minerales arcillosos del grupo de la caolinita en más de un 60 % los que presentan un gran potencial para el desarrollo de puzolanas. Seguidamente aparecen otros silicatos relacionados a los minerales formadores de rocas representados principalmente por el cuarzo minerales formadores de rocas que son estables y que no intervienen primariamente en la reacción puzolánica. Por último, sobresalen los óxidos de Fe y Al en este caso que son térmicamente inestables y han sido los responsables de la coloración rojiza de estas arcillas.

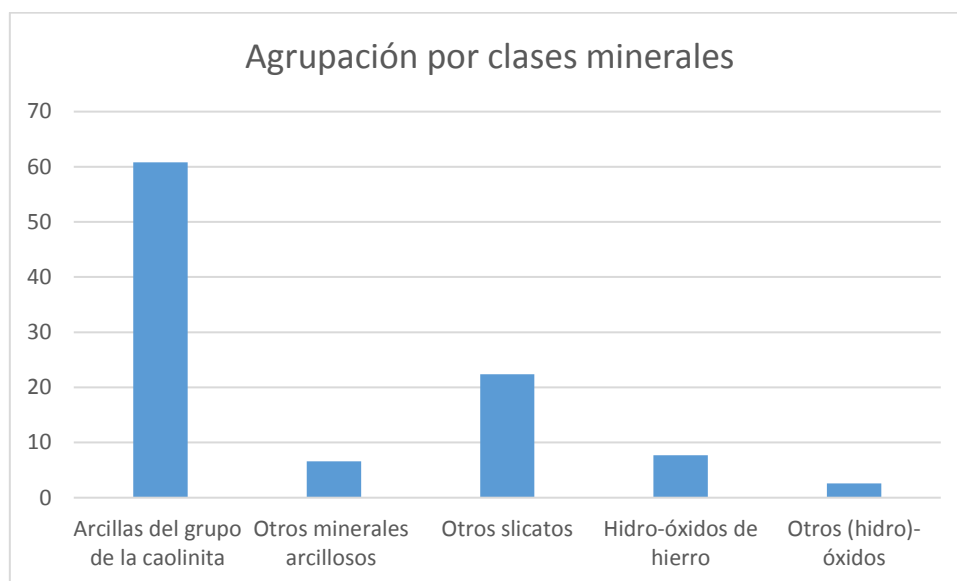


Figura 17: Clasificación por clases minerales de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos (DM) teniendo en cuenta su efecto potencial en el rendimiento final como MCS

3.4. Evaluación de las potencialidades para la producción de cemento de bajo carbono según la metodología de Almenares Reyes del 2017

Según la clasificación para la evaluación de las potencialidades de los depósitos arcillosos como fuente de materiales cementicios suplementarios desarrollada por Almenares y colaboradores (Almenares-Reyes 2017; Almenares Reyes RS et al. 2021) las arcillas se ubica en el grupo IV de la clasificación, se pronostica que deben presentar un contenido de caolín equivalente variable y es característico la presencia de contenidos apreciables de minerales no arcillosos que se descomponen en el mismo intervalo de temperatura que los minerales del grupo de la caolinita. Esto está en consonancia con los resultados mineralógicos donde se identificó la presencia de óxidos de hierro (goethita y hematita) y aluminio (diásporo); además de mica moscovita que también es un mineral térmicamente activo. Por la alta variabilidad que presentan este tipo de arcillas se recomienda su evaluación de forma independiente (Figura 18).

Siguiendo esta recomendación se sigue la metodología propuesta por los mismos autores que desarrollaron el procedimiento (Almenares-Reyes 2017; Almenares Reyes RS et al. 2021), utilizando el método gráfico. Se extrapola la

ubicación de la muestra en el diagrama a partir de una línea paralela al eje de las ordenadas hasta la línea A y la nueva posición en el gráfico ubica la muestra en los límites de la zona II. Sobre la base de estos resultados los residuos rojos arcillosos del yacimiento Dumañuecos pueden considerarse con potencialidades para ser empleado como fuente de SCM. Aunque, se considera necesario realizar una valoración adicional, sobre la base del comportamiento de la reactividad y las prestaciones físico-mecánicas en sistemas mezclados.

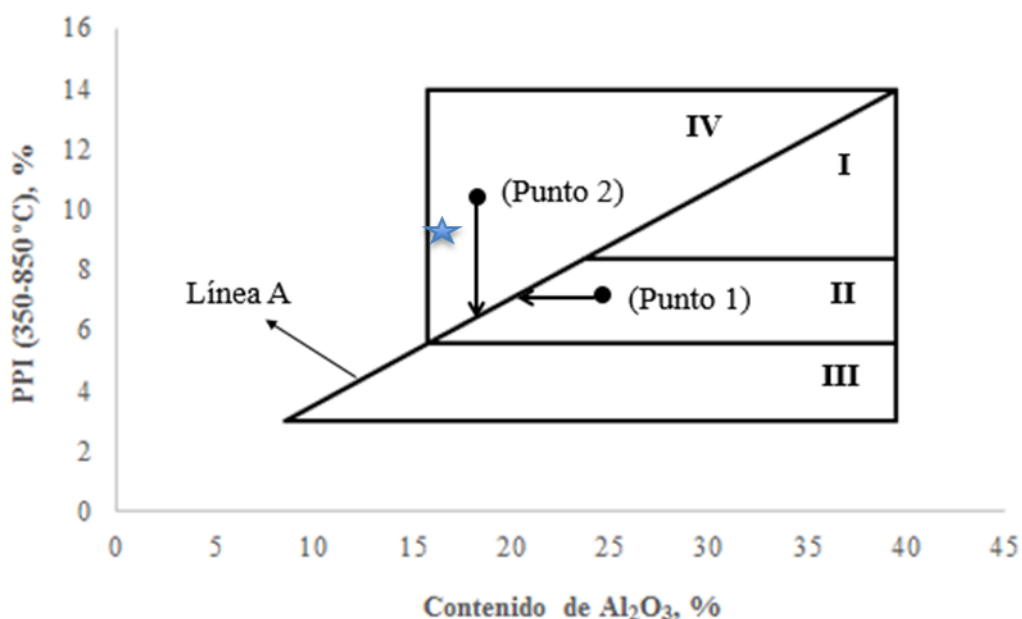


Figura 18: Potencialidades de las arcillas de Dumañuecos para la producción de cemento de bajo carbono

3.5. Conclusiones parciales

- Los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos presentan contenidos elevados de SiO_2 y Al_2O_3 lo que está condicionado por la presencia de aluminosilicatos representados por caolinita y nacrita en un 60,7 %. Además de considerables contenidos de Fe_2O_3 en forma de goethita y hematita en un 7,7 %, lo que ha ocasionando su coloración rojiza.
- Se identificó que la paragénesis mineral típica de los residuos arcillosos están constituida por caolinita+ nacrita+ cuarzo+ goethita+ hematita+ moscovita+ diásporo por lo que la génesis de las arcillas originales está relacionada con procesos de meteorización sobre las rocas riolíticas que se encuentran afectadas por los procesos hidrotermales.

- Se constato que en las muestras estudiadas las variaciones de PPI y Ke sobre los 750°C fueron mínimas por lo que se considera esta la temperatura óptima de activación.

CONCLUSIONES

1. La composición química de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos cumple con los requisitos químicos de la norma cubana TS 528: 2013 (NC TS 528:2013 2013) por lo que se pueden considerar como aditivos minerales de tipo N o F.
2. Los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos están constituidos mineralógicamente por un 60,7 % por minerales arcillosos del grupo de la caolinita representados por caolinita y nacrita; lo que les confiere un alto potencial para ser usadas como puzolanas.
3. Los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos un valor promedio de pérdidas de masa por deshidroxilación de 9 % y el contenido promedio de caolín equivalente determinado fue de 64,5 % a 850 °C.
4. Los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos según la metodología de Almenares Reyes se clasifican como arcillas de tipo IV, por lo que pueden presentar variabilidad durante el proceso de activación asociada a la presencia de óxidos de Fe y Al, lo que no tiene una incidencia negativa en su reactividad puzolánicas por lo que se consideran con buenas perspectivas para ser empleado como fuente de materiales cementicios suplementarios.

RECOMENDACIONES

- Evaluar la reactividad puzolánica en morteros mediante resistencia a la compresión de los residuos arcillosos rojos del yacimiento Dumañuecos activados térmicamente.
- Evaluar las perspectivas de otros residuos mineros que contengan materiales arcillosos para la obtención de puzolanas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELAZIZ, G.E., SHOUKRY, H., SELIM, A.A. y SAIF, M.S., 2023. Recent Progress in Limestone-Calced Clay Cement (LC3): A Review. *Materials Science Forum*, vol. 1089, pp. 165-174. DOI 10.4028/p-74p7so.
- ALMENARES-REYES, R.S., 2017. *Potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas para la obtención de materiales cementicios suplementarios*. Santa Clara, Cuba: Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- ALMENARES, 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.
- ALMENARES REYES, R.S., DÍAZ, A.A., RODRÍGUEZ, S.B., RODRÍGUEZ, C.A.L. y HERNÁNDEZ, J.F.M., 2018. Assessment of Cuban kaolinitic clays as source of supplementary cementitious materials to production of cement based on clinker – Calced clay – Limestone. En: F. MARTIRENA, A. FAVIER y K. SCRIVENER (eds.), *Calced Clays for Sustainable Concrete*. Dordrecht: Springer, pp. 21-28. ISBN 9789402412062.
- ALMENARES REYES RS, MARTIRENA HERNÁNDEZ, J.F., LEYVA RODRÍGUEZ, C.A., BETANCOURT RODRÍGUEZ, S. y ARCIAL CARRATALÁ, F., 2021. Identificación y evaluación de arcillas caoliníticas para la producción de cemento ternario LC3 y adiciones minerales activas LC2. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, vol. 11, no. 3, pp. 1-9.
- 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.
- ALUJAS DIAZ, A., ALMENARES-REYES, R.S., HANEIN, T., IRASSAR, E.F., JUENGER, M., KANAVARIS, F., MAIER, M., MARSH, A.T.M., SUI, T., THIENEL, K.-C., VALENTINI, L., WANG, B., ZUNINO, F. y RUBEN SNELLINGS, 2022. Properties and occurrence of clay resources for use as supplementary cementitious materials : a paper of RILEM TC 282-CCL. *Materials and Structures* [en línea], vol. 2. ISSN 1871-6873. DOI 10.1617/s11527-022-01972-2. Disponible en: <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01972-2>.
- ARIOSA IZNAGA, J.D., 1984. *Curso de Yacimientos Minerales No Metálicos*. S.l.: s.n.
- ARRUDA JUNIOR, E.S., DE SALES BRAGA, N.T. y SANTOS BARATA, M., 2023.

- Life cycle assessment to produce LC3 cements with kaolinitic waste from the Amazon region, Brazil. *Case Studies in Construction Materials*, pp. 0-15. DOI 10.1016/j.cscm.2022.e01729.
- 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.
- BALESTRA, C.E.T., SAVARIS, G., NAKANO, A.Y. y SCHNEIDER, R., 2022. Carbonation of concretes containing LC3 cements with different supplementary materials Carbonation of concretes containing LC 3 cements with different supplementary materials Carbonatação de concretos contendo cimento LC 3 com diferentes materiais supleme. *Ciênc. Ex. Tech.*, vol. 43, pp. 161-170. DOI 10.5433/1679-0375.2022v43n2p161.
- BATISTA, R., 2011. *Rocas y minerales industriales de la República de Cuba*. S.l.: s.n.
- BEN HAH, M., TERMKHAJORNKIT, P., OUZIA, A., UPPALAPATI, S. y HUET, B., 2023. Cement and Concrete Research Low clinker systems - Towards a rational use of SCMs for optimal performance. *Cement and Concrete Research* [en línea], vol. 174, no. March, pp. 107312. ISSN 0008-8846. DOI 10.1016/j.cemconres.2023.107312. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107312>.
- BRACE, T., BENHAM, W., PIMENTEL, H. y MOREL, R., 1996. Report of work on the Dumañuecos property, Camagüey area, East-Central Cuba. . S.l.:
- CALLEJA, J., 1982. Escorias y cementos siderúrgicos. <http://materconstrucc.revistas.csic.es> [en línea], vol. 186. Disponible en: <http://materconstrucc.revistas.csic.es>.
- COLECTIVO DE AUTORES, 1978. *Atlas de Cuba XX Aniversario del Triunfo de la Revolución Cubana 1978* [en línea]. La Habana: s.n. Disponible en: <http://repositorio.geotech.cu/jspui/handle/1234/3515>.
- CORTÉS, G.R.M., KOZIEVITCH, V.F.J., XAVIER, C., HENNIES, W.T. y VALENZUELA, F.R., 2004. Propriedades cerâmicas de caulins da república de cuba. parte iii. caulim dumañuecos. , pp. 1-8.
- DÍAZ ÁLVAREZ, A., 2014. *Evaluación de mezclas de arcillas con adición de tobas vítreas para la fabricación de ladrillos cerámicos*. Bayamo. Prov. Granma. S.l.: INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO DE MOA.

- ECHEVARRIA, B. y TALAVERA CORONEL, F; TCHOUNEV, D; IANEV, S; TZANKOV, T., 1986. Petrografía y geoquímica de las vulcanitas de la región Guáimaro-Las Tunas. *Ciencias de la Tierra y del Espacio* 11/86, vol. 11, pp. 5.
- ESCOBAR LORET DE MOLA, E., 2018a. Características comunes de la mineralización aurífera en las provincias de Ciego de Avila, Camaguey y Las Tunas. *Anuario de la Sociedad Cubana de Geología*, no. 2310-0060, pp. 3-28.
- ESCOBAR LORET DE MOLA, E., 2018b. Características comunes de la mineralización aurífera en las provincias de Ciego de Ávila, Camaguey y Las Tunas. *Revista Cubana de Geociencias*, no. 2310-0060, pp. 3-28.
- ESPINOSA-BORGES, A.E., PÉREZ-GARCÍA, L.A., LEYVA-RODRÍGUEZ, C.A., CRUZ-RAMÍREZ, Y., COBAS-TORRES, R.Y., TORRES-LA ROSA, M. y AGUIRRE-GUILLOT, G., 2022. Análisis petrográfico y minerográfico de las rocas del yacimiento de arcillas caoliníticas Dumañuecos. *Minería y Geología*, vol. 38, no. 1993 8012, pp. 53-69.
- ESPINOSA BORGES, A.E., PÉREZ GARCÍA, L.A., LEYVA RODRÍGUEZ, C.A., ALMENARES REYES, R.S. y ALUJAS DÍAZ, A., 2019. *Evaluación de las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos para la producción de cemento de bajo carbono*. S.l.: Universidad de Moa Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ.
- ESUBALEW KASSA, A., TEFERA SHIBESHI, N., ZEGALE TIZAZU, B. y VENKATESA PRABHU, S., 2022. Characteristic Investigations on Ethiopian Kaolinite : Effect of Calcination Temperature on Pozzolanic Activity and Specific Surface Area. *Advances in Materials Science and Engineering*,
- FERNÁNDEZ PÉREZ, J., 2019. Producción de cemento LC3 en Cuba : El camino de la autarquía. *Cubadebate*. 24 mayo 2019. pp. 6.
- FERNANDEZ, R., MARTIRENA, F. y SCRIVENER, K.L., 2011. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals : A comparison between kaolinite , illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 1, pp. 113-122. ISSN 0008-8846. DOI 10.1016/j.cemconres.2010.09.013.
- FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, J., 1990. Proyecto de Explotación del Yacimiento de colín Dumañuecos, Provincia de Las Tunas. . La Habana, Cuba:
- FERRARA, L., DEEGAN, P., PATTARINI, A., SONEBI, M. y TAYLOR, S., 2019. Recycling ceramic waste powder: effects its grain-size distribution on fresh and hardened properties of cement pastes/mortars formulated from SCC mixes. *Journal*

- of Sustainable Cement-Based Materials* [en línea], vol. 8, no. 3, pp. 145-160. ISSN 21650381. DOI 10.1080/21650373.2018.1564396. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1564396>.
- FLATT, R.J., ROUSSEL, N., BESSAIES-BEY, H., CANEDA-MARTÍNEZ, L., PALACIOS, M. y ZUNINO, F., 2023. Cement and Concrete Research From physics to chemistry of fresh blended cements. *Cement and Concrete Research* [en línea], vol. 172, no. May, pp. 107243. ISSN 0008-8846. DOI 10.1016/j.cemconres.2023.107243. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107243>.
- FURRAZOLA BERMÚDEZ, G., GIL, S., DIAZ DE VILLALVILLA, L., GARCÍA DELGADO, D.E., DELGADO DAMAS, R., PEÑALVER HERNÁNDEZ, L.L., DÍAZ, C., GUTIÉRREZ DOMECH, R., HUELBS ALONSO, J. de y LINARES CALA, E., 2013. *Léxico Estratigráfico de Cuba*. 2013. S.l.: s.n.
- GALÁN, E., 2006. Genesis of clay minerals. *Handbook of Clay Science*. Sevilla, Spain: Elsevier Ltd., pp. 1129-1162.
- GALAN HUERTOS, E. y MARTIN VIVALDI, J.L., 1975. Depósitos hidrotermales. *Boletín de la Socieda Española de Cerámica y Vidrio*,
- GALÁN HUERTOS, E. y MARTIN VIVALDI, J.L., 1973. Clasificación de los depósitos de caolines españoles según su ambiente genético. *BOL. SOC. ESP. CERÁM. VIDR*, vol. 12.
- GONZÁLEZ JIMÉNEZ, H.A., PÉREZ GARCÍA, L.A. y ESPINOSA BORGES, A.E., 2022. *Análisis de similitudes geoquímicas de manifestaciones de arcillas caoliníticas en Cuba Oriental relacionadas genéticamente con la Formación Caobilla*. S.l.: Universidad de Moa.
- HASLAR, O., 1971. Informe del viaje oficial Oriente en los días del 12 al 16 de mayo de 1971. . S.l.:
- HE, C., OSBAECK, B. y MAKOVICKY, E., 1995. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research*, vol. 25, pp. 1691-1702.
- HENDRIKS, C., WORRELL, E., JAGER, D., BLOK, K. y RIEMER, P., 2004. *Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry*. Interlaken, Suiza: s.n.
- HEVIA DELGADO, L.F., 1983. Informe final de Exploración Complementaria en el yacimiento de caolín Dumañuecos. Prov. Las Tunas. . Las Tunas:
- HEVIA DELGADO, L.F., 1983. Informe final de Exploración Complementaria en el

- yacimiento de caolín Dumañuecos. Prov. Las Tunas. . Las Tunas:
- HEVIA DELGADO, L.F.L.F. y ONRM, 1983. Informe final de Exploración Complementaria en el yacimiento de caolín Dumañuecos. Prov. Las Tunas. . Las Tunas:
- ITURRALDE-VINENT, M.A., 1994. Cuban Geology: A New Plate-Tectonic Synthesis. *Journal of Petroleum Geology*, vol. 17, no. 1, pp. 39-70. ISSN 00094021.
- ITURRALDE-VINENT, M.A., 1998. Sinopsis de la constitucion geologica de Cuba. *Acta Geologica Hispanica*, vol. 33, no. 1-4, pp. 9-56. ISSN 05677505.
- ITURRALDE VINENT, M., 1996. *Ofiolitas y arcos Volcanicos de Cuba*. Miami: s.n. ISBN 9788578110796.
- JHATIAL, A.A., NOVÁKOVÁ, I. y GJERLØW, E., 2023. A Review on Emerging Cementitious Materials, Reactivity Evaluation and Treatment Methods. *Buildings*, vol. 13. DOI <https://doi.org/10.3390/buildings13020526>.
- JOHN, E. y LOTHEBACH, B., 2023. Cement hydration mechanisms through time – a review. *Journal of Materials Science* [en línea], ISSN 1573-4803. DOI 10.1007/s10853-023-08651-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08651-9>.
- JOHN, V.M., 2002. On the sustainability of the Concrete. *UNEP Journal Industry and Environment*, pp. 7.
- KREIKER, J., CARRIZO, J.C., CEPPI, S. y MUTAL, R., 2014. Caracterización de desechos industriales inorgánicos para ser usados como material suplementario en morteros cementicios. *XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, vol. 1, no. November 2014, pp. 2512-2521. DOI 10.17012/entac2014.318.
- LABRADOR HERRERA, L.M., 2018. Utilizan en Las Tunas cemento de bajo carbono. *Granma*. 14 marzo 2018. pp. 3.
- MAIER, M., FORSTER, B., BEUNTNER, N. y THIENEL, K.C., 2020. Potential of a calcined recycling kaolin from silica sand processing as supplementary cementitious material. En: S. BISHNOI (ed.), *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Singapore: Springer, pp. 75-83.
- MARTÍN CORTÉS, GUILLERMO RUPERTO; THEODORO HENNIES, WILDOR; VALENZUELA DÍAZ, F.R., 2005. CONTRIBUTION TO A TECHNOLOGICAL CHARACTERIZATION OF KAOLINS FROM CUBA AND BRAZIL. *PTECH-2005 FIFTH INTERNATIONAL LATIN - AMERICAN CONFERENCE ON*

- MARTÍNEZ DE LA CRUZ, E., 2017. *Evaluación de las arcillas rojas de Centeno para su utilización como material cementicio suplementario*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
- MATIAS, G., FARIA, P. y TORRES, I., 2014. Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review. *Construction and Building Materials*, vol. 73, no. April 2018, pp. 125-136. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.028.
- MILIAN, I., DÍAZ DE VILLALVILLA, L.B., PÉREZ, M. y PALACIOS. BIENVENIDO, 2001. Características geoquímicas y minerológicas de las rocas de la Formación Caobilla. *IV CONGRESO DE GEOLOGIA Y MINERIA MINERALOGÍA, PETROLOGÍA Y GEOQUÍMICA MIPEGQ*, pp. 19-23.
- NC TS 528:2013, 2013. Cemento hidráulico - Puzolanas- Especificaciones. . La Habana, Cuba.
- ONRM, 1985. Informe sobre la prueba de planta piloto de las muestras de caolín del cuerpo 2 del yacimiento «Dumañuecos». . S.l.:
- PAPADAKIS, V.G. y TSIMAS, S., 2002. Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design. *CEMENT AND CONCRETE RESEARCH*, vol. 32, pp. 1525-1532.
- PAPAKOSTA, A., KANAVARIS, F., PANTELIDOU, H. y BURR-HERSEY, T., 2020. Re-purposed Excavated Arisings Loop Transformation of London Clay into construction resources : Supplementary cementitious material and lightweight aggregate REAL Stage 1a : London Clay material characterisation. . S.l.:
- PÉREZ-GONZÁLEZ, L.L., QUINTANA-PUCHOL, R., PERDOMO- GONZÁLEZ, L. y ALUJAS-DÍAZ, A., 2019. Potencialidad de la mezcla escoria de cubilote-cascarilla de laminación-viruta de aluminio para obtener un material puzolánico mediante aluminotermia. *Minería y Geología*, vol. 35 n.4, no. 1993 8012, pp. 464-479.
- RAMOS LARA, J.F., 2015. *Activación de Sistemas Binarios y Ternarios Base Cemento Portland con Residuos Agro-Industriales*. NUEVO LEÓN : UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.
- REDACCIÓN DIGITAL, 2019. Cuba abrirá primera fábrica de cemento lc3 del mundo. *Granma* [en línea]. 24 mayo 2019. pp. 4. Disponible en: <http://www.granma.cu/cuba/2019-05-24/cuba-abrira-primera-fabrica-de-cemento-lc3-del-mundo-24-05-2019-10-05-58>.

- ROESSLER, C. y STARK, J., 2003. Der Einfluß von Fließmitteln auf die Hydratation von Portlandzement. *IBAUSIL*. Weimar: s.n., pp. 1-523.
- SCRIVENER, K., BEN HAH, M., JUILLAND, P. y LEVY, C., 2023. Research needs for cementitious building materials with focus on Europe. *RILEM Technical Letters* [en línea], vol. 7, pp. 220- 252. Disponible en: <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.165>.
- SGARLATA, C., FORMIA, A., SILIGARDI, C., FERRARI, F. y LEONELLI, C., 2022. Mine clay washing residues as a source for alkali-activated binders. *Materials*, vol. 15, no. 1, pp. 1-14. ISSN 19961944. DOI 10.3390/ma15010083.
- SOBOLEV, K., KOZHUKHOVA, M., SIDERIS, K., MENÉNDEZ, E. y SANTHANAM, M., 2018. Alternative Supplementary Cementitious Materials. En: RILEM (ed.), *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing*. S.l.: SpringerLink, ISBN 9783319706061.
- SÖYEK ABAY, B. y TANAÇAN, L., 2023. 2nd International Conference on Innovative Academic A review on Limestone Calcined Clay Cement (LC 3) as an alternative ecological binder. *2nd International Conference on Innovative Academic Studies*. S.l.: s.n.,
- SURVEY, U.S.G., 2023. *Mineral commodity summaries 2023: U.S. Geological Survey*. S.l.: s.n. ISBN 9781411345041.
- TALAVERA CORONEL, F; ECHEVARRIA, B; TCHOUNEV, D; IANEV, S; TZANKOV, T., 1986. Características generales del vulcanismo en la región Ciego de Ávila-Camagüey-Las Tunas(Cuba). *Ciencias de la Tierra y del Espacio* 11/86, pp. 25.
- VALDÉS, G.C., 1987. *Proyecto de búsqueda detallada, exploración orientativa y detallada de caliza. Manatí, Provincia Las Tunas*. S.l.: Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.
- VELDE, B., 1995. *Origin and mineralogy of clays. Clays and the environment*. S.l.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-08195-8.
- XARGAY, H., RIPANI, M., CAGGIANO, A., FOLINO, P. y MARTINELLI, E., 2019. Uso de materiales reciclados en compuestos cementicios. *Tecnura* [en línea], vol. 23, no. 60, pp. 38-51. [Consulta: 14 marzo 2022]. ISSN 2248-7638. DOI 10.14483/22487638.14697. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/14697>.
- YANGUATIN, H., RAMÍREZ, J.H., TIRONI, A. y TOBÓN, J.I., 2019. Effect of thermal

treatment on pozzolanic activity of excavated waste clays. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 211, pp. 814-823. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.300. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.300>.

ZAMORA, V.M., 2008. *Geoquímica de las aguas subterráneas de La Provincia de Las Tunas*. S.l.: s.n.

ZITO, S.V., IRASSAR, E.F. y RAHHAL, V.F., 2020. Management of sanitary ware wastes as supplementary cementing materials in concretes. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* [en línea], vol. 9, no. 1, pp. 35-49. ISSN 21650381. DOI 10.1080/21650373.2019.1673258. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1673258>.

LISTA DE LAS ABREVIATURAS UTILIZADAS

OPC	Cemento Portland Ordinario
MCS	Materiales Cementicios Suplementarios
LC3	Cemento de Bajo Carbono
PPI	Pérdidas por Ignición
Ke	Caolín Equivalente