

Análisis del comportamiento de un mortero de recubrimiento con adición de ceniza rica en sílice
a partir de desechos agroindustriales del cultivo de caña panelera en Santander

Andrés Felipe Gómez González

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director:

. Luis Alberto Capacho Silva

Magister en Informática y Ciencias de la Información

Codirector:

Diego Luis Franco Jácome

Doctor en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

DEDICATORIA

Dedicado a ese ser superior, que reconforta en los momentos difíciles y coloca en nuestro camino a buenas personas que animan a soportar las cargas.

Especialmente dedicado a mis padres; Graciela González Higuera y Rodrigo Gómez Manrique, a mi hermana Diana María Gómez González, a mi abuelita Florinda Higuera y a mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que contribuyeron con su colaboración, apoyo y dirección en el desarrollo del trabajo.

- + A mi familia por su constante interés, colaboración y paciencia en la elaboración del trabajo de grado.
- + Al director del trabajo de grado, el Ingeniero Luis Alberto Capacho Silva y al codirector, el Ingeniero Diego Luis Franco Jácome, por su apoyo e interés durante el desarrollo del presente proyecto, por sus orientaciones y aportes.
- + A los Técnicos del laboratorio de Procesos, Luis Eduardo Carreño Pérez y Wilson Eduardo Carreño Soler, al coordinador del CILIQ, Héctor Joaquín Orozco Monroy de la Escuela de Ingeniería Química y a los técnicos del Laboratorio de Caracterización de Materiales de Construcción de la Escuela de Ingeniería Civil por su colaboración desinteresada y constante a lo largo del trabajo, en la elaboración de ensayos, pruebas de laboratorio y asesoría.
- + A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería Civil por la formación académica recibida durante el pregrado, así como la Escuela de Ingeniería Química por la disponibilidad de recursos técnicos para el desarrollo satisfactorio de la presente investigación.
- + Al profesor José Antonio Henao Martínez, a Silvia Juliana Molina Guevara y Cindy Johana Díaz Cepeda, profesionales del Laboratorio de Difracción de Rayos-X del Parque Tecnológico Guatiguará, adscrito a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander
- + Al Ingeniero Químico Javier Ronaldo Sanabria Cucunuva, mi mejor amigo, por su apoyo y colaboración constante en toda la elaboración del trabajo de grado.
- + Por último a la Selección de Rugby de la Universidad Industrial de Santander por la formación personal y los mejores años en la universidad.

Andrés Felipe Gómez González

Tabla de contenido

Introducción	15
1 Objetivo principal	17
1.1 Objetivos específicos	17
2 Revisión bibliográfica.....	17
2.1 Cemento Portland.....	18
2.1.1 Producción de Cemento Portland.....	18
2.1.2 Composición del Cemento Portland.....	19
2.1.3 Hidratación y Endurecimiento del Cemento	21
2.2 Mortero.....	25
2.2.1 Tipos de Mortero.....	26
2.2.2 Morteros de Cemento.....	26
2.2.3 Propiedades de los Morteros en Estado Plástico.....	27
2.2.4 Propiedades de los Morteros en Estado Endurecido.	28
2.2.5 Impacto ambiental de los morteros.	30
2.3 Materiales Puzolánicos.....	31
2.3.1 Tipos de Puzolanas.....	31
2.3.2 Actividad Puzolánica.	32
2.4 Biomasa.....	33
2.4.1 Tipos de Biomasa.....	35
2.4.2 Bagazo de caña. de la caña.....	36

2.5	Caña Panelera.....	36
2.5.1	Indicadores Generales.	37
2.5.2	Área, Producción y Rendimiento.	38
3	Materiales y metodología.....	40
3.1	Materiales.....	41
3.1.1	Cemento Portland.....	41
3.1.2	Arena.	42
3.1.3	Agua.	42
3.1.4	Bagazo de caña y ceniza de bagazo de caña.	43
3.2	Metodología	44
3.2.1	Recolección del material.	44
3.2.2	Pretratamiento del material.	45
3.2.3	Caracterización Fisicoquímica de las Cenizas de Bagazo.	50
3.2.4	<i>Caracterización de los Morteros.</i>	55
4	Resultados y Discusiones.....	58
4.1	Caracterización Fisicoquímica de la Ceniza	58
4.1.1	<i>Análisis termogravimétrico.</i>	58
4.1.2	<i>Microscopía electrónica de barrido.</i>	61
4.1.3	Difracción de Rayos X.	64
4.1.4	Espectrometría de absorción infrarroja.	65
4.1.5	Análisis granulométrico..	66

4.1.6	Determinación de la densidad del cemento y las cenizas.	67
4.2	Caracterización de los morteros	68
4.2.1	<i>Determinación de la fluidez.</i>	68
4.2.2	<i>Determinación de la actividad puzolánica</i>	69
4.2.3	Análisis de precios	71
5	Conclusiones	72
6	Recomendaciones	73
	Bibliografía	74
	Apéndices.....	80

Lista de Tablas

<i>Tabla 1 Composición mineral del Clinker.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 2 Temperaturas de descomposición de materiales lignocelulósicos.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 3 Porcentajes de pérdidas de la masa</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 4 Composición química (% de óxidos) de las cenizas</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 5 Fases cristalinas identificadas en las cenizas.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 6 Densidades de las cenizas y el cemento.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 7 Dosificación para fluidez 110 ± 5 de las muestras.....</i>	<i>68</i>

Lista de Figuras

Figura 1 Evolución de la producción de cemento en Colombia	19
Figura 2 Representación esquemática de la formación e hidratación del <i>cemento</i>)	22
Figura 3 Desarrollo de la resistencia a la compresión de los componentes puros.	24
Figura 4 Calor de hidratación que desarrollan de los componentes puros	25
Figura 5 Generación de biomasa.....	33
Figura 6 Clasificación de las fuentes de energía.....	34
Figura 7 Caracterización de zonas de producción de panela.	38
Figura 8 Cantidad municipal anual de los residuos de cultivo de caña panelera.....	39
Figura 9 Diagrama del programa experimental	41
Figura 10 (a) Cemento, (b) Arena, (c) Agua.....	42
Figura 11 Depósito del trapiche San Cristóbal	43
Figura 12 (a) Depósito de bagazo, (b) Depósito de ceniza.	44
Figura 13 (a) Tamiz; (b) Bagazo.....	45
Figura 14 (a) Horno; (b) Bagazo Seco.....	46
Figura 15 (a) Molino de Cuchillas; (b) Partículas tamiz 2 mm; (c) Partículas tamiz 1 mm	47
Figura 16 (a) Agitador vertical; (b) Agitación; (c) Bagazo molido después de la agitación.	47
Figura 17 Rampa temperatura de la mufla.....	48
Figura 18 (a) Ceniza pre calcinada; (b) Mufla; (c) Ceniza calcinada.	49
Figura 19 (a) Molino; (b) Cuerpos moledores	50
Figura 20 (a) Analizador Termogravimétrico; (b) Crisol con la muestra.	50
Figura 21 (a) Espectrofotómetro de Infrarrojo; (b) Ubicación de la muestra	52
Figura 22 (a) Microscopio Electrónico de Barrido; (b) Ubicación de la muestra	52

Figura 23 Difractómetro de Rayos-X; (b) Portamuestra con ceniza.....	54
Figura 24 (a) Tamizadora; (b) Conjunto de tamices.....	54
Figura 25 (a) Frasco con kerosene; (b) Frasco con kerosene y ceniza de campo.....	55
Figura 26 (a) Mesa de flujo y anillo; (b) Mesa de flujo y calibrador.....	56
Figura 27 Cubos para ensayo de compresión	57
Figura 28 Maquina universal de ensayos.....	58
Figura 29 (Izq) ATG del bagazo; (Der) Derivada del ATG del bagazo.	60
Figura 30 Curvas termogravimétricas de las cenizas.....	61
Figura 31 (Izq) Imagen de CBC; (Der) Análisis elemental CBC	61
Figura 32 (Izq) Imagen de CBL; (Der) Análisis elemental CBL.....	62
Figura 33 Difractogramas de las cenizas.....	65
Figura 34 Espectro infrarrojo de las cenizas	66
Figura 35 Granulometría cenizas	67
Figura 36 Curva granulométrica de la arena.....	67
Figura 37 Resistencia a la compresión.....	69
Figura 38 Índice de Actividad Puzolánica	70
Figura 39 Precio para el proceso de 1 kg de bagazo para CBL	71

Lista de Apéndices

Apéndice A. Cemento	80
Apéndice B. Arena.....	81
Apéndice C. Agua del acueducto metropolitano de Bucaramanga 2017	84
Apéndice D. Microscopía Electrónica de Barrido.	85
Apéndice E. Difracción de Rayos X.....	91
Apéndice F. Análisis granulométrico.	92

Resumen

Título: análisis del comportamiento de un mortero de recubrimiento con adición de ceniza rica en sílice a partir de desechos agroindustriales del cultivo de caña panelera en Santander*

Autor: Andrés Felipe Gómez González**

Palabras Clave: Bagazo de caña, cenizas, materiales puzolánicos, actividad puzolánica.

Descripción:

En este trabajo fue estudiado el potencial y posible valorización de las cenizas residuales de la combustión de bagazo de caña como posible fuente de material puzolánico en la fabricación de mortero de recubrimiento. Dos muestras de cenizas fueron analizadas: las producidas directamente en la hornilla del trapiche (CBC) y las obtenidas bajo condiciones controladas en el laboratorio (CBL). La caracterizaron de las cenizas incluyó: Análisis Termogravimétrico, Espectrometría de Absorción Infrarroja, Microscopía Electrónica de Barrido y Difracción de Rayos X. Para los morteros de recubrimiento fue determinado el Índice de Actividad Puzolánica a los 7 y 28 días. Los resultados mostraron que las cenizas analizadas contienen sílice en diferentes proporciones, 51,38 % para CBC y 84,97 % para CBL. Los morteros con adición de cenizas (con tamaño de partícula menor a 74 μm) presentaron índices de actividad puzolánica (IAP) equivalentes a 49,79 % y 60,44 % para CBC y CBL, respectivamente. Estos valores son menores a los sugeridos por la norma ASTM C-618. A pesar de la alta presencia de sílice en las cenizas y la presencia de estructuras amorfas, la reactividad de estas con el hidróxido de calcio fue insuficiente para ser consideradas como material puzolánico. Se sugiere estudiar la resistencia mecánica y la durabilidad de CBC y CBL con tamaños de partícula menores de 44 μm , así como estudiar concentraciones diferentes de cenizas en las mezclas de mortero de recubrimiento

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Luis Alberto Capacho Silva, Ingeniero Civil, M.Sc. Codirector: Diego Luis Franco Jácome Ingeniero Mecánico, Ph.D.

Abstract

Title: Analysis of the behavior of coating mortars with additions of silica-rich ashes produced by the sugarcane industry in Santander*

Author: Andrés Felipe Gómez González**

Key Words: Cane bagasse, Ashes, Pozzolanic materials, Pozzonlanic activity

Description:

In this work we studied the potential and possible recovery of residual ash from the combustion of bagasse as a possible source of pozzolanic material in the manufacture of coating mortar. Two ash samples were analyzed: those produced directly in the trapiche burner (CBC) and those obtained under controlled conditions in the laboratory (CBL). The ash characterization included: Thermogravimetric Analysis, Infrared Absorption Spectrometry, Scanning Electron Microscopy and X-ray Diffraction. For the coating mortars, the Pozzolanic Activity Index was determined at 7 and 28 days. The results showed that the analyzed ashes contain silica in different proportions, 51.38 % for CBC and 84.97 % for CBL. Mortars with the addition of ashes (with particle size smaller than 74 μm) showed pozzolanic activity indexes (IAP) equivalent to 49.79% and 60.44% for CBC and CBL, respectively. These values are lower than those suggested by ASTM C-618. Despite the high presence of silica in the ashes and the presence of amorphous structures, their reactivity with calcium hydroxide was insufficient to be considered as pozzolanic material. It is suggested to study the mechanical strength and durability of CBC and CBL with particle sizes smaller than 44 μm , as well as studying different concentrations of ashes in the mortar coating mixtures.

* Bachelo Tesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Luis Alberto Capacho Silva, Ingeniero Civil, M.Sc. Codirector: Diego Luis Franco Jácome Ingeniero Mecánico, Ph.D.

Introducción

Colombia es catalogado como el segundo productor de panela después de la India, contribuyendo con aproximadamente el 10 por ciento de la producción mundial(13 millones t/año) y con el mayor consumo per cápita (cerca de 32 kg/año).(Rodríguez, Garcia, Roa Diaz, & Santacoloma, 2004)

Según la Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano, en el 2017 el departamento de Santander contó con 39.937 ha de cultivos de caña panelera y una producción estimada de 271.259 t de panela. De esta manera, Santander presentó el mayor rendimiento promedio del país (6,79 t/ha), haciéndolo el mayor productor de panela en Colombia, superado en área sembrada únicamente por Cundinamarca y Antioquia.(Colombia., 2018)

En el municipio de Barbosa, se encuentra la zona de producción llamada “Hoya del Río Suárez”, donde se estima que existen 19.792 ha sembradas, con una producción de 180.871 t de panela al año. Esto genera alrededor de 1’135.870 t de residuos, los cuales comprenden el bagazo, las hojas y cogollo.(Escalante Hernández, Orduz Prada, Zapata Lesmes, Cardona Ruiz, & Duarte Ortega, 2007)

La agroindustria panelera nacional se caracteriza por su bajo nivel tecnológico y por mantener procesos artesanales (Rodríguez et al., 2004). De su producción se derivan grandes cantidades de residuos, los cuales tienen un elevado potencial de valorización energética ya sea por la combustión directa o a través de la transformación en biocombustibles (por su alto contenido de azúcares).(Escalante Hernández et al., 2007) También son utilizados como materia prima en la producción de papel debido a su alto contenido de celulosa.

Generalmente las hojas de la caña cosechada se dejan en el cultivo para su descomposición natural, el bagazo se aprovecha como combustible en la cocción de la panela y la ceniza restante de la combustión de la hormilla se utiliza como fertilizante o se dispone en montones sin un uso definido. Dado lo anterior, el estudio de nuevas alternativas para la valorización de estos desechos se convierte en tema de interés para la agroindustria.

Por otro lado, el cemento es el material de construcción más utilizado en el mundo. Sin embargo, en las últimas décadas ha comenzado a cuestionarse su utilización de forma masiva debido al impacto ambiental que provoca su fabricación. Según Águila (2011), por el aumento en la producción mundial de cemento desde 1990, se encuentra entre los materiales cuyo uso representa mayor afectación al medio ambiente.(Águila, 2011)

Debido a la inherente demanda de estos materiales, se ha convertido en un reto para los investigadores y especialistas encontrar alternativas eficientes que permitan optimizar su uso, reduciendo las afectaciones ambientales producidas tanto en su elaboración como en su utilización.(Águila, 2011)

Una alternativa es el uso de materiales silico–aluminosos denominados puzolanas, las cuales presentan grandes ventajas al reaccionar con productos de la hidratación del cemento, aumentando resistencias mecánicas y mejorando la durabilidad de las mezclas. No obstante, se hace necesario el control de su comportamiento mediante el monitoreo de algunas propiedades como el desarrollo del fraguado.

A fin de contribuir con las alternativas de valorización de los desechos agroindustriales generados convencionalmente en el cultivo de caña panelera, en este trabajo se estudiaron las características fisicoquímicas de las cenizas generadas por la combustión controlada de bagazo y las producidas en la hornilla para su posible uso como aditivo para el mortero de recubrimiento.

1 Objetivo principal

Evaluar el efecto de las cenizas producidas por la combustión de bagazo de caña de azúcar panelera como aditivo en la preparación de mortero.

1.1 Objetivos específicos

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de las cenizas del bagazo de caña panelera.

Determinar la actividad puzolánica de la ceniza de caña procesada en el laboratorio y la recolectada en campo.

Determinar la viabilidad de utilizar las cenizas de bagazo de caña panelera como aditivo en la preparación de morteros de recubrimiento.

2 Revisión bibliográfica

Con el objetivo de profundizar en la caracterización de la ceniza de bagazo de caña panelera y evaluar su posible uso para la producción de mortero de recubrimiento, es necesario definir y analizar algunos conceptos fundamentales, los cuales se definen a continuación:

2.1 Cemento Portland

El cemento *Portland* es un aglomerante hidráulico, finamente molido, inorgánico; que al mezclarse con agua forma una pasta que fragua y endurece por hidratación. Después del endurecimiento presenta excelentes propiedades de solidez, resistencia y estabilidad. Este endurecimiento se debe principalmente a la formación de hidratos de silicato de calcio, que a su vez son los encargados de fijar las partículas de agregados. Además de los silicatos de calcio, existen otros elementos del cemento en menor proporción como los aluminatos de calcio que también participan en las reacciones de fraguado y endurecimiento.(Avalos Esquivel, Saldaña Costa, & Farro Perez, 2013).

2.1.1 Producción de Cemento Portland. El consumo mundial de cemento para el año 2015 fue de más de 4000 millones de toneladas, se estimó para el 2016 un consumo mayor a los 4100 millones de toneladas y se pronosticó un aumento cercano al 1% para el 2017(Federación Interamericana del Cemento - FICEM, 2018). Colombia para el año 2015 se encontraba dentro de los 30 primeros países productores de cemento.

A nivel de américa latina y el caribe para este mismo año se encontraba en la tercera posición, superado solamente por Brasil y México (Asociación de Productores de Cemento - ASOCEM, 2018; Federacion Interamericana del Cemento - FICEM, 2018).

En la Figura 1 se muestra la evolución de la producción nacional de cemento *Portland* desde abril de 2009 hasta febrero de 2019.

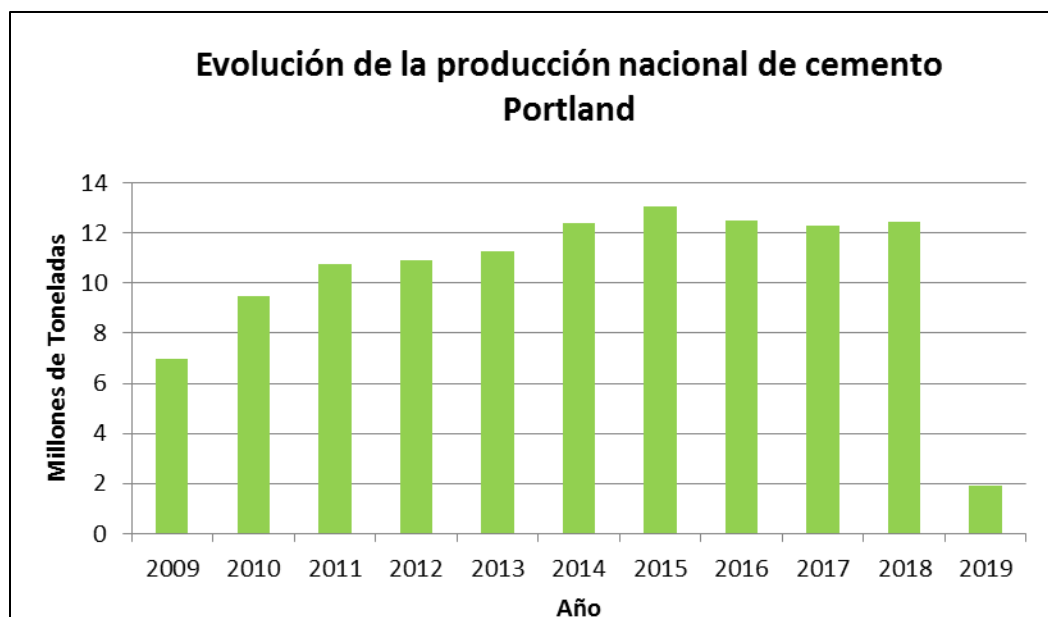


Figura 1 Evolución de la producción de cemento en Colombia. Adaptado del Boletín Técnico Estadísticas de Cemento Gris-DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, 2019)

2.1.2 Composición del Cemento Portland. Los materiales que componen el cemento *Portland* se obtienen luego de procesos de extracción, calcinación y molienda de materias primas como caliza, arcilla, arena, mineral de hierro, entre otros.

La fabricación del cemento *Portland* se lleva a cabo en 3 etapas.

- Preparación de las materias primas.
- Producción del *Clinker*.
- Preparación del cemento.

Las materias primas para la producción de cemento *Portland* deben contener óxidos de calcio, silicio, aluminio, hierro y magnesio; que al ser calcinados a una temperatura cercana a los 1400 °C modifican su estructura química dando como resultado el compuesto llamado *Clinker*. Este debe molido hasta alcanzar una granulometría con partículas inferiores a 75 µm.

En el *Clinker* están presentes los componentes descritos en la Tabla 1; donde se muestra de manera conceptual sus características.

Tabla 1

Composición mineral del Clinker.

Componente	Fórmula	Abreviatura	Calor de Hidratación (cal/g)	% en peso (Rango)	Propiedades Técnicas del cemento
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	123	45 – 65	Endurecimiento rápido, alto calor de hidratación.
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	62	10 – 30	Endurecimiento lento, de crecimiento sostenido. Bajo calor de hidratación.
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	273	5 – 15	En cantidades altas, endurecimiento rápido: fraguado rápido, alto calor de hidratación, tendencia a la fisuración, sensibilidad a las aguas sulfatadas.
Ferrito-aluminato Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_4AF	100	5 – 12	Endurecimiento lento, resistente a las aguas selenitosas.
Cal Libre	CaO	C	277	0.1 – 4	En pequeñas cantidades no es perjudicial; en grandes, provoca expansión y fraguado rápido.
Magnesio Libre	MgO	M	203	0.7– 1.5	En cantidades grandes, expansión por la magnesia

Nota. Extraída de Fritz Keil Cemento Fabricación – Propiedades – Aplicaciones (Fritz Keil, 1973)

Durante la calcinación del *clinker* los óxidos se combinan con los componentes ácidos de las materias primas produciendo los compuestos Silicato Tricálcico, Silicato Dicálcico, Aluminato Tricálcico y Ferrito aluminato Tetracálcico que representan entre 90% al 95% en peso del cemento.(Calderón Pelaez, Martinez Cabrera, Alvarado Quintana, & Vasquez Alfaro, 2017)

Debido a que el C_3A existente en el *clinker* reacciona inmediatamente con el agua, es necesario adicionar yeso para estabilizar esta reacción y evitar problemas generados por endurecimiento prematuro y elevado calor de hidratación. A la mezcla de *clinker* con yeso es lo que comúnmente se conoce como cemento *Portland*.

2.1.3 Hidratación y Endurecimiento del Cemento Portland. La hidratación del cemento es el resultado de procesos químicos y físicos entre el cemento *Portland* y el agua, mediante el cual este material, reacciona y empieza a generar enlaces o estructuras cristalinas, que lo convierten en un material aglutinante. Las reacciones de hidratación son exotérmicas y la cantidad de calor desprendido depende del tipo de cemento, de las fases existentes, de la presencia de aditivos y de la finura (Silva, 2017). El producto solidifica en unas horas y endurece progresivamente por varias semanas hasta obtener su resistencia característica.

En la hidratación se tienen en cuenta las fases principales del *clinker*: *celita* (C_3A), *alita* (C_3S), *belita* (C_2S), y *felita* (C_4AF). Una representación simple de las reacciones de hidratación se presenta en la Ecuación(1) y una representación esquemática en la Figura 2

Fases anhidras del Clinker de alto contenido energético + agua

→ Fases hidratadas de bajo contenido energético (1)
+ energía (calor de hidratación)

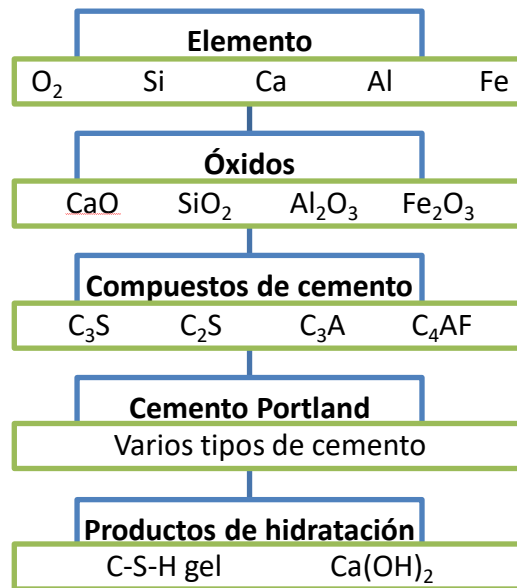
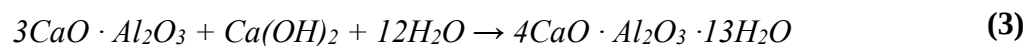


Figura 2 Representación esquemática de la formación e hidratación del *cemento Portland*. Adaptado de Tecnología do Concreto (Neville & Brooks, 2013)

El endurecimiento inicial es producido por la reacción del agua, yeso y aluminato tricálcico (C₃A), también denominada fase *celita*, formando una estructura cristalina de calcio-aluminio-hidrato, etringita y monosulfoaluminato de calcio (Silva, 2017). Contribuyendo ligeramente a la resistencia temprana del cemento. A continuación, se muestra la reacción de la fase *celita* en la Ecuación(2)



El C₃A también reacciona con gran rapidez en presencia de hidróxido de calcio Ca (OH)₂, el cual se forma en la hidratación de los silicatos cálcicos (*alita* y *belita*). Se muestra la reacción de Celita con Ca (OH)₂ en la Ecuación(3)



Las reacciones de la fase *celita* producen un fraguado demasiado rápido del cemento. Con la adición de yeso en la molienda del *clinker* evita este efecto. Aunque un exceso de yeso puede causar fenómenos expansivos en los morteros y hormigones. (Silva, 2017)

La siguiente reacción química la efectúa el silicato tricálcico (C_3S), también denominada fase *alita*, que además de aportar la mayor resistencia mecánica, desarrolla un elevado calor de hidratación, fragua rápido y afecta la resistencia inicial. El C_3S reacciona con agua para formar silicatos cálcicos hidratados (fases CSH), con desprendimiento simultáneo de hidróxido de calcio. (Silva, 2017) La reacción de la fase *alita* se muestra en la Ecuación(4)



La reacción efectuada por el silicato dicálcico (C_2S), denominada fase *belita*, desarrolla su resistencia lentamente con la acción del agua, por ende su calor de hidratación es bajo y su resistencia a compresión se empieza a desarrollar a los 7 días. (Silva, 2017) Se muestra la reacción fase *belita* en la Ecuación(5)



El aluminato tricálcico (C_3A) y el ferrito-aluminato tetracálcico (C_4AF) tienen un aporte poco significativo comparado con el silicato dicálcico (C_2S) y silicato tricálcico (C_3S) en cuanto a resistencia a la compresión. En la Figura 3 se muestra el desarrollo de la resistencia a la compresión de cada componente:

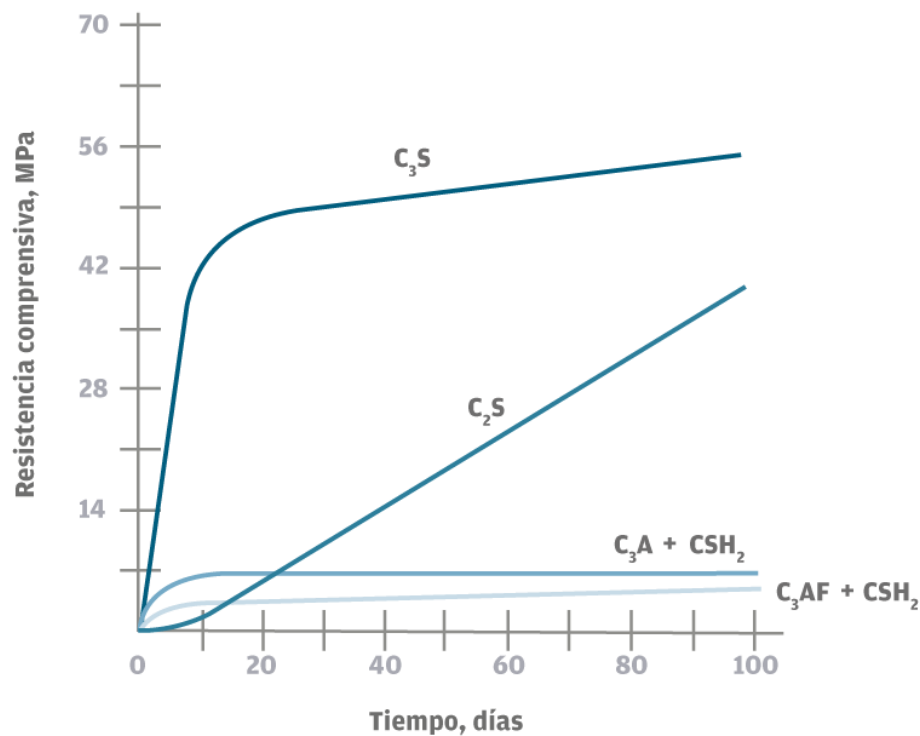
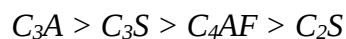


Figura 3 Desarrollo de la resistencia a la compresión de los componentes puros. Extraída de Blog 360 en Concretos de Argos (Silva, 2017)

Las reacciones de hidratación son afectadas ampliamente con el aumento de la temperatura del medio, en climas cálidos se debe tener esto en cuenta para controlar el desarrollo del calor de hidratación (Silva, 2017); El mayor aporte de calor a la reacción química lo hace el aluminato tricálsico (C₃A) y en segundo lugar el silicato tricálsico (C₃S), sin embargo en los primeros 10 a 15 minutos de la reacción el aporte calorífico lo realiza el C₃S (Neville & Brooks, 2013), en la Figura 4 se muestra el calor de hidratación que desarrollan de los componentes puros del cemento.



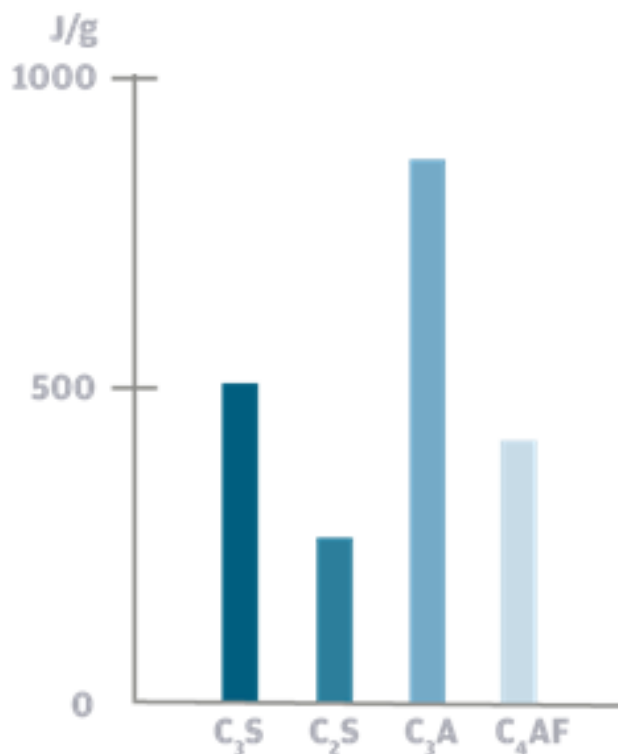


Figura 4 Calor de hidratación que desarrollan de los componentes puros, Extraída de Blog 360 en Concretos de Argos (Silva, 2017)

De los compuestos formados en la hidratación, los silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) son los más importantes debido a que estos compuestos aportan las propiedades de cohesión y adherencia, así que a mayor concentración de estos mejor será la calidad del material (Uchima Quintero, 2015).

La principal aplicación del cemento *Portland* es la elaboración de morteros y concretos, en la siguiente sección se hará énfasis en una de estas aplicaciones que es el mortero.

2.2 Mortero

El mortero es una mezcla homogénea de un material cementante (cemento), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y en algunas ocasiones aditivos según sea la necesidad. (Gutierrez de Lopez, 2003)

En Colombia el mortero se usaba tradicionalmente como material de revoque y para pega en mampostería. En las últimas décadas se ha utilizado en la mampostería estructural por lo cual sus propiedades tomaron más importancia en los últimos años.(Gutierrez de Lopez, 2003)

2.2.1 **Tipos de Mortero.** Según su endurecimiento existen dos tipos de mortero: Los aéreos que son aquellos que endurecen al aire al perder agua por secado y su fraguado es lento por carbonatación, y los hidráulicos que endurecen bajo la acción del agua y su composición les permite desarrollar resistencias iniciales relativamente altas.(Gutierrez de Lopez, 2003)

Según los materiales que los constituyen, pueden ser:

- Morteros calcáreos
- Morteros de yeso
- Morteros de cal y cemento
- Morteros de cemento

En el desarrollo de este trabajo nos centraremos en los Morteros de Cemento ya que son los más empleados en Colombia.

2.2.2 **Morteros de Cemento.** Se componen de arena, agua y cemento *Portland*. Este mortero tiene altas resistencias y sus condiciones de manejo son variables de acuerdo con la proporción de cemento y arena utilizados. El mortero de cemento es hidráulico y debe prepararse teniendo en cuenta que entre el amasado y la colocación haya el menor tiempo posible.(Gutierrez de Lopez, 2003)

Como todas las mezclas de cemento, la calidad de este mortero es dependiente de las características de la arena, tales como la granulometría, módulo de finura, forma y textura de las partículas, así como también del contenido de materia orgánica.(Gutierrez de Lopez, 2003)

Si el mortero tiene poco contenido de cemento hace a la mezcla áspera y poco trabajable, esto debido a que el cemento se comporta como un lubricante entre las partículas de arena. Por el contrario, si presenta alto contenido de cemento el mortero presentará alta retracción en el secado, esto quiere decir que es muy susceptible a agrietarse; los morteros de este tipo se usan en muros de contención y cimientos por su alta resistencia.(Gutierrez de Lopez, 2003)

Los morteros se pueden usar en la construcción de elementos estructurales o en mampostería estructural, siendo de mortero de pega o en relleno de celdas de los muros.

Además, existen otros morteros que se emplean como pañetes, repellos o revoques, estas aplicaciones no tienen función estructural.

- Mortero de pega: Esta sometido a condiciones especiales de cada sistema constructivo, por tanto debe tener cualidades especiales que le permitan soportar esfuerzos de tensión y compresión.(Gutierrez de Lopez, 2003)
- Morteros de relleno: Se utilizan para llenar las celdas de los elementos en la mampostería estructural, y al igual que el mortero de pega debe tener una adecuada resistencia.(Gutierrez de Lopez, 2003)
- Morteros de recubrimiento: Su función no es estructural por lo tanto no requieren una resistencia determinada, la finalidad es proporcionar una superficie uniforme para aplicar acabados o pintura. La plasticidad para este tipo de morteros es muy importante dado que facilita la manipulación de la mezcla.(Gutierrez de Lopez, 2003)

2.2.3 Propiedades de los Morteros en Estado Plástico. Teniendo en cuenta que los morteros de cemento se deben aplicar en el menor tiempo posible después de su elaboración, las propiedades para tener en cuenta en estado fresco son las siguientes:

Manejabilidad: Es una medida de la facilidad de manipulación de la mezcla, expresa la facilidad de colocación del mortero, depende de la proporción de arena/cemento y de la forma, textura y módulo de finura de la arena. Se mide con la fluidez de la mezcla en la mesa de flujo. El método para determinar la fluidez de mortero de cemento hidráulico se define en la norma NTC-111, aunque en la práctica se define por la pericia del albañil (Gutierrez de Lopez, 2003).

Retención de agua: Es la capacidad del mortero de mantener su plasticidad al quedar en contacto con la superficie en la cual va a ser aplicado, para aumentar la retención de agua se puede aumentar el contenido de finos en la arena, agregar cal, usar aditivos plastificantes o incorporadores de aire. La retención de agua influye en la velocidad de endurecimiento y en la resistencia final, ya que un mortero que no retenga el agua no permite la óptima hidratación del cemento. (Gutierrez de López, 2003)

Velocidad de endurecimiento: Es la tasa de evaporación del agua de la mezcla en función del tiempo. Depende del diseño de la mezcla y de las condiciones ambientales como el clima y humedad. (Gutierrez de Lopez, 2003) La consistencia de la pasta de cemento se mide por medio del Aparato de Vicat, según la norma NTC-4088.

2.2.4 Propiedades de los Morteros en Estado Endurecido. Se refiere a las propiedades que el mortero va a tener durante su vida útil, con estas características el mortero soportara las solicitudes que requiera dependiendo de su uso.

Retracción: Es el cambio de volumen de la pasta de mortero ocasionadas por reacciones químicas al deshidratarse, esta retracción aumenta cuando el mortero tiene alto contenido de cemento; también es proporcional al espesor de la capa y a la absorción de la superficie en que se va a colocar la pasta. Se debe tener en cuenta que en climas cálidos y/o de mucho viento, el agua

se evapora más rápido produciendo tensiones internas que provocan grietas visibles en el mortero.(Gutierrez de Lopez, 2003)

Adherencia: Es la capacidad de resistir tensiones normales y tangenciales a la superficie en que se aplicó el mortero, es decir, la capacidad de responder monolíticamente con las piezas que une ante solicitudes de carga. Se recomienda que la superficie sea lo más rugosa posible y que presente una absorción similar a la del mortero para aumentar su adherencia.(Gutierrez de Lopez, 2003)

Resistencia: Es la respuesta a las tensiones provocadas por pequeños movimientos diferenciales de la superficie de soporte, las tensiones son generadas por cambios ambientales, impactos, agresiones externas o movimientos de la estructura. Las resistencias mecánicas que debe atender los morteros de recubrimiento son a la compresión y a la tracción.(«Propiedades de los Morteros de Revestimiento | Construpedia, enciclopedia construcción», s. f.)

La resistencia a la compresión brinda una idea de la cohesión interna del mortero, lo cual quiere decir que es la capacidad de soportar presiones sin disgregarse.(«Propiedades de los Morteros de Revestimiento | Construpedia, enciclopedia construcción», s. f.) El método para determinar la resistencia a la compresión del mortero de cemento hidráulico se define en la norma NTC-220.

La resistencia a la tracción aporta información sobre la dificultad de las partículas para separarse. Es conocido que los morteros y demás mezclas de cemento tienen baja resistencia a la tracción, por lo anterior se debe asegurar que el material no estará sometido a estas solicitudes.(«Propiedades de los Morteros de Revestimiento | Construpedia, enciclopedia construcción», s. f.) El método para determinar la resistencia a la tracción del mortero de cemento hidráulico se define en la norma NTC-119.

Durabilidad: Es la resistencia que presenta el mortero ante agentes externos como la temperatura, la penetración de agua, el desgaste por abrasión y corrosión, ciclos de hielo y deshielo, entre otros. Se puede decir que los morteros con alta resistencia a la compresión tienen alta durabilidad por la cohesión de sus partículas.(Gutierrez de Lopez, 2003)

2.2.5 **Impacto ambiental de los morteros.** El impacto ambiental generado por los morteros y en general por las mezclas de cemento, está asociado a su uso masivo y a la producción de los materiales que lo componen, en especial del cemento. Con este estudio se propone dar una alternativa para reducir el impacto ambiental descrito a continuación:

- La elaboración de cemento y la obtención de agregados requiere extraer grandes cantidades de rocas naturales, las cuales son recursos no renovables; además, en el proceso de extracción se destruyen grandes superficies de capa vegetal.(Águila, 2011)
- Los procesos de clinkerización, molienda del cemento y la producción de agregados, incluyen procesos de extracción, trituración, transporte y bombeo de agua que consumen grandes cantidades de electricidad y combustibles fósiles.(Águila, 2011)
- Las emisiones de material particulado y gases de combustión generados por las plantas de producción alteran negativamente la calidad del aire en las zonas donde están ubicadas.
(Águila, 2011)

Una alternativa para disminuir el contenido de cemento en los morteros son los materiales puzolánicos; estos materiales tienen la capacidad de remplazar parte del cemento en los morteros sin sacrificar sus propiedades características.

2.3 Materiales Pozolánicos

Las puzolanas son materiales silíceos o silico-aluminosos que poseen poco o ningún valor cementante en su estado natural, sin embargo, al ser finamente molidos y a una temperatura ordinaria, poseen aptitudes para reaccionar con el hidróxido de calcio que se genera durante el proceso de fraguado del cemento, para formar así productos hidratados con propiedades conglomerantes.(Montoya Tobon & Tobon, 2009; Soria Santamaría, 2012)

La importancia de la reacción pozolánica se basa en tres aspectos;

- La liberación de calor es lenta, esto aumenta el tiempo de trabajo de la mezcla (Rodrigues, 2012; Soria Santamaría, 2012).
- El hidróxido de calcio será consumido por la reacción y no lo producirá, esto mejora la durabilidad de la pasta endurecida cuando entre en contacto con medios ácidos(Rodrigues, 2012; Soria Santamaría, 2012).
- Los productos de la reacción son bastante eficientes en el llenado de los espacios capilares grandes, mejorando la resistencia y la impermeabilidad de la mezcla endurecida(Rodrigues, 2012; Soria Santamaría, 2012).

2.3.1 Tipos de Pozolanas. La clasificación más aceptada de las puzolanas se relaciona con su origen. En esta clasificación encontramos puzolanas de origen natural y puzolanas de origen artificial:

Puzolanas de origen natural: Este tipo de puzolana no requiere ningún tratamiento inicial diferente a la molienda. No requieren modificaciones químicas o mineralógicas porque son activas en su forma original(Soria Santamaría, 2012). Algunos ejemplos de puzolanas naturales:

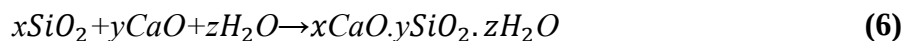
- Cenizas volcánicas

- Tufas o tobas volcánicas
- Tierras de diatomeas

Puzolanas de origen artificial: Este tipo de materiales adquieren sus propiedades puzolánicas por medio de un tratamiento térmico adecuado, que modifica su estructura química y hace que su actividad puzolánica aparezca o aumente dependiendo del caso (Soria Santamaría, 2012). Algunos ejemplos de puzolanas artificiales:

- Cenizas volantes
- Arcillas activadas térmicamente
- Microsílice (humo de sílice)
- Escoria de Alto Horno o de fundición
- Cenizas de biomasa (cáscara de arroz o bagazo de caña)

2.3.2 **Actividad Puzolánica.** La actividad puzolánica es la reacción entre la puzolana y el hidróxido de calcio producidos por la hidratación de la alita y la velita, el producto de esta reacción son silicatos cálcicos hidratados (C-S-H). Esta reacción se da a temperatura ambiente. Se muestra la reacción simplificada de la activada puzolánica en la Ecuación(6)



El método para determinar la actividad puzolánica que contribuye a la resistencia a la compresión del cemento hidráulico se define en la norma NTC-1784.

El presente estudio se orienta hacia la obtención de una puzolana artificial (cenizas de la combustión) a partir del bagazo de caña panelera. Esta biomasa fue adquirida como subproducto de la agroindustria panelera del departamento de Santander.

2.4 Biomasa

Por biomasa se entiende el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía., 2007). La energía que puede obtenerse a partir de la biomasa proviene de la luz solar, gracias al proceso de fotosíntesis de las plantas verdes, se convierte mediante reacciones químicas, el dióxido de carbono del aire y es transformarlo en sustancias orgánicas. Este proceso se observa en la Figura 5 y en la Ecuación(7) la simplificación de las reacciones de fotosíntesis.

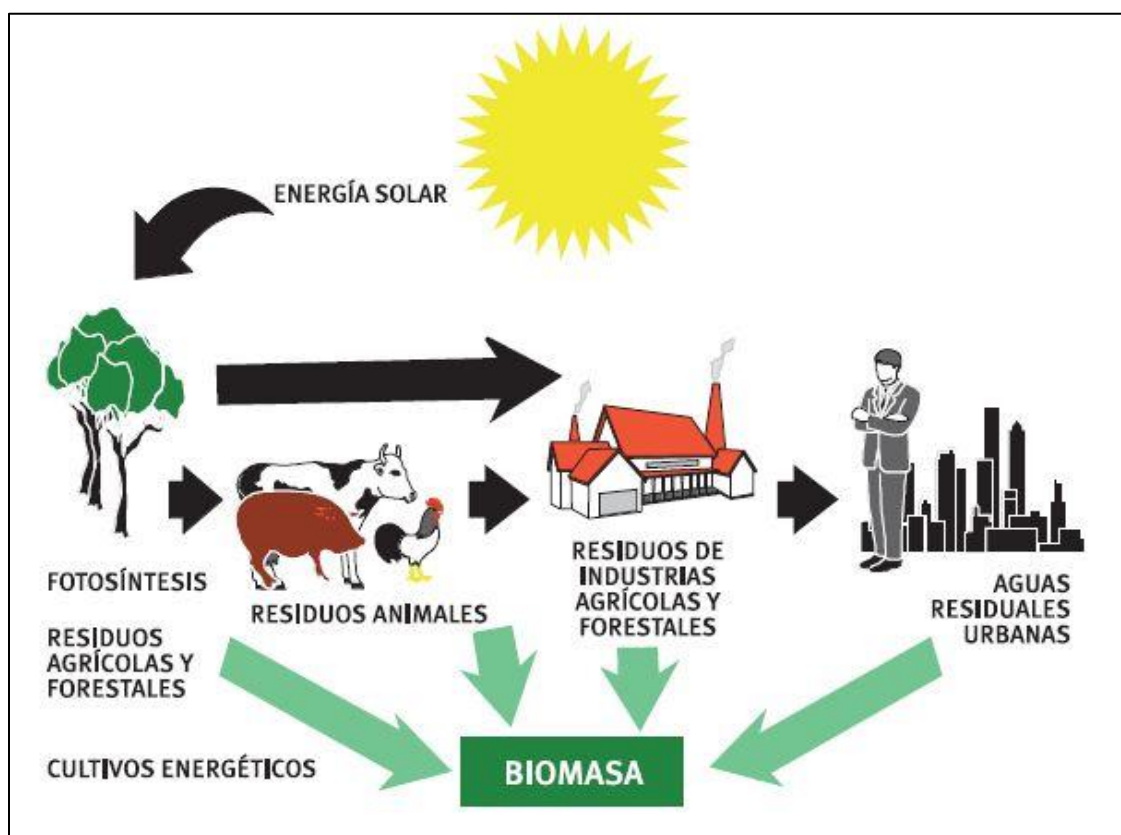
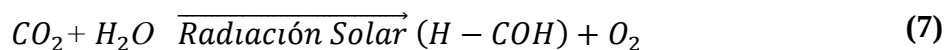


Figura 5 Generación de biomasa. Adaptada de Energía de la Biomasa (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía., 2007)



Se excluyen del término biomasa al carbón, petróleo y gas natural. A pesar que estos recursos provienen de fuentes animales y vegetales, son considerados de origen fósil (no renovable) debido a los profundos cambios estructurales de mineralización que han sufrido con el paso del tiempo (Escalante Hernández et al., 2007). En la Figura 6 se aprecia la ubicación de la biomasa dentro de las fuentes de energía primarias.

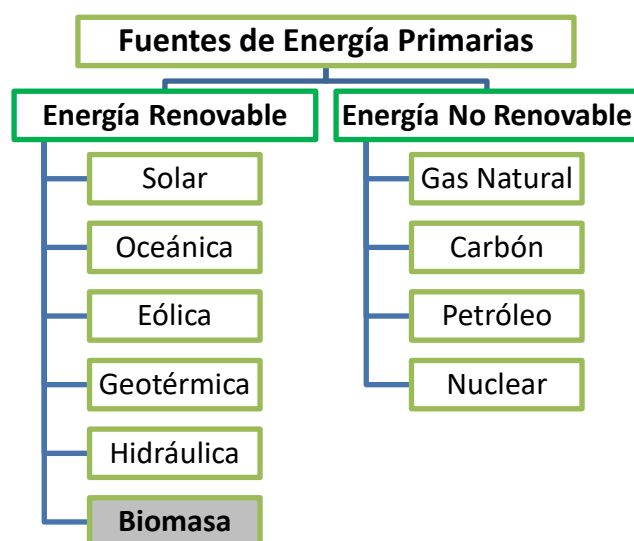


Figura 6 Clasificación de las fuentes de energía. Adaptado de Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia (Escalante Hernández et al., 2007)

Se considera que la biomasa es una fuente de energía renovable porque forma parte del flujo natural y repetitivo de los procesos en la naturaleza, siendo las plantas las que inician el proceso con la fotosíntesis aprovechando la radiación solar (Escalante Hernández et al., 2007).

La combustión de biomasa de un cultivo sostenible no contribuye al aumento del efecto invernadero porque el carbono que se libera forma parte de la atmósfera actual. El carbono del subsuelo, presente en el gas o el petróleo, fue capturado en épocas remotas y rompería este delicado equilibrio. El aporte cero al calentamiento global se da siempre y cuando exista un balance cero

entre la biomasa producida por el medio natural y la usada en la producción de energía(Escalante Hernández et al., 2007; Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía., 2007).

2.4.1 **Tipos de Biomasa.** La biomasa se puede clasificar de acuerdo con su origen en:

Biomasa Natural: Es la que se produce en ecosistemas naturales. La explotación intensiva de este recurso no brinda una protección al medio ambiente, aunque sea una de las principales fuentes energéticas en países subdesarrollados(Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía., 2007).

Biomasa Residual: Hace referencia a los subproductos que se derivan de las transformaciones naturales o industriales que se llevan a cabo en la materia orgánica. Algunos ejemplos son: Residuos Forestales y Agrícolas, Residuos de Industrias Forestales y Agrícolas, Residuos Sólidos Urbanos, Residuos Biodegradables (efluentes ganaderos, lodos de depuradoras, aguas residuales urbanas, entre otros) (Escalante Hernández et al., 2007; Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía., 2007).

Cultivos Energéticos: Son cultivos realizados con un único objetivo que es el aprovechamiento energético. Se caracterizan por una gran producción de materia viva por unidad de tiempo y por el acondicionamiento para minimizar los cuidados del cultivo comparado con un cultivo tradicional(Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía., 2007).

Excedentes agrícolas: Los excedentes agrícolas que no sean aprovechados en la alimentación humana pueden ser considerados como biomasa y se pueden aprovechar para la elaboración de biocombustibles líquidos, además con un tratamiento térmico adecuado pueden transformarse en materiales puzolánicos (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía., 2007).

La biomasa de interés para el desarrollo de este estudio es el bagazo de caña, esto debido al volumen generado por los trapiches en Santander y la necesidad de dar un uso diferente y de mayor valor comercial al tradicional. En la actualidad el material es usado como combustible en las hornillas y como materia prima para abono.

2.4.2 Bagazo de caña. El bagazo es el material excedente de la caña luego del proceso de extracción del jugo. Es un material fibroso, heterogéneo en su composición granulométrica y estructural; presenta baja densidad y un alto contenido de humedad por el proceso de trituración de la caña. Su composición comprende: 45 a 57% contenido de agua, 39 a 53% contenido de fibra y 2 a 6% sólidos disueltos (García Rincón, Toscano, & Guerrero Gómez, 2015).

La fibra a su vez puede subdividirse en dos componentes principales:

- Una fibra verdadera, compuesta por las células de las paredes fuertes, duras y cilíndricas del tallo(García Rincón et al., 2015).
- La medula, que es el componente que hace referencia a las células de paredes delgadas, blandas y de forma irregular del tejido interior del tallo(García Rincón et al., 2015).

La importancia de la caña panelera en Colombia va más allá del ámbito industrial y comercial, siendo una de las agroindustrias con más impacto social debido a la población que afecta, tanto en su producción como en su consumo como se detalla en el siguiente capítulo.

2.5 Caña Panelera

Es importante aclarar que no existen diferencias radicales entre las variedades de caña de azúcar para producción de panela o azúcar, la diferencia está en las tecnologías de producción y el objetivo del proceso. En este trabajo se llamará caña panelera debido al origen de la biomasa.

El nombre científico de la caña panelera es *Saccharum officinarum L*, originaria del Sureste Asiático y Nueva Guinea. Es una planta cespitosa con tallos de hasta 5 ó 6 m, con un diámetro aproximado de 2 a 5 cm. En las hojas de la planta de caña se realiza la síntesis de los diferentes carbohidratos a partir de las diferentes materias primas (agua, CO₂ y nutrientes) y la radiación solar. La caña de azúcar es un cultivo de clima cálido, tropical y subtropical, que requiere temperatura atmosférica alta, humedad atmosférica elevada y lluvias abundantes, sobre todo en la etapa de crecimiento. El cultivo tolera clima relativamente variado, encontrándose una exigencia diferente entre la fase de crecimiento y maduración. Se observa una interrupción de su crecimiento con temperatura fría y extremadamente alta y seca. Los residuos generados en el proceso de beneficio son las hojas y el bagazo.(Durán, Insuasty, & Viveros, 2014; Rodriguez et al., 2004).

2.5.1 Indicadores Generales. El sector panelero es la segunda agroindustria nacional en importancia social después del café. Más de 350.000 familias están vinculadas a esta industria generando alrededor de 287.000 empleos directos, los que equivalen a 45 millones de jornales al año y ocupa el 12% de la población rural económicamente activa (Colombia., 2018).

Según el Censo Nacional Agropecuario, el área sembrada para 2017 fue de 367.251 ha en todo el país. Se estima un área cosechada de 308.490 ha, con un rendimiento promedio del 5,1 t de panela por ha, lo que se traduce en una producción aproximada de 1.573.299 t de panela para en el 2018 (Colombia., 2018).

La caña para panela se cultiva en 511 municipios de 28 departamentos y es el eje de la economía de cerca de 117 municipios. Siendo los departamentos de mayor influencia productiva: Cundinamarca, Cauca, Antioquia, Santander, Boyacá, Nariño, Valle del Cauca, Tolima, Caldas, Norte de Santander, Risaralda y Huila, donde se concentra el 83% del área cultivada(Colombia., 2018).

En la Figura 7 se observa los departamentos con mayor influencia en el sector panelero y su denominación por núcleos de producción. Su ubicación geográfica coincide con la zona andina, esto debido a las características que presenta su clima que son favorable para el cultivo de la caña.

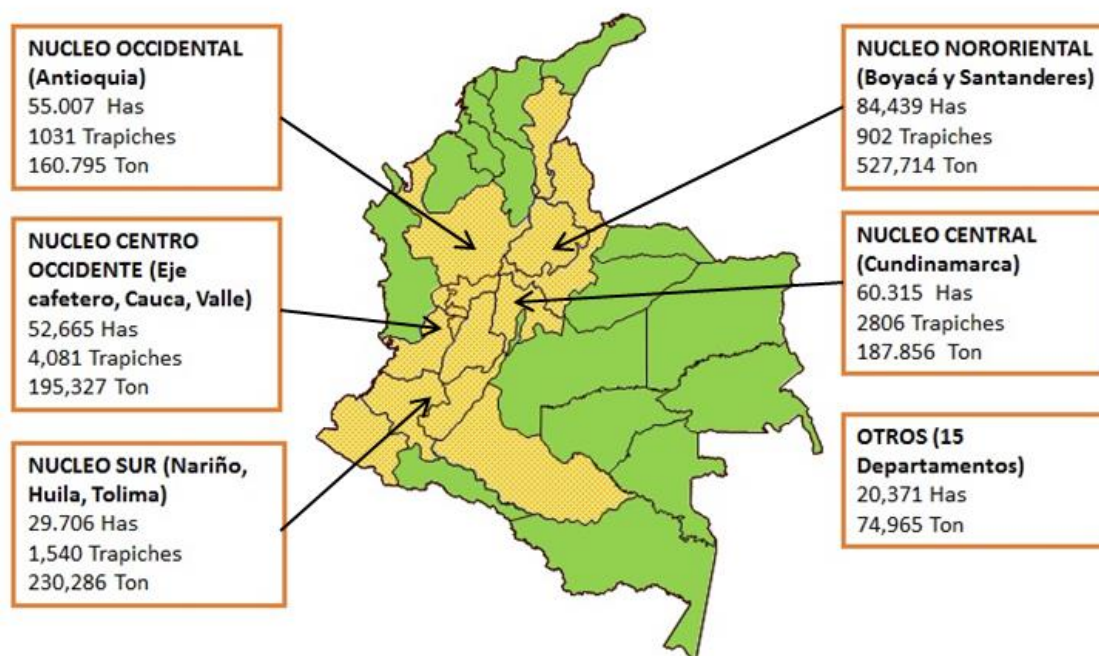


Figura 7 Caracterización de zonas de producción de panela. Extraída de Agronet - Ministerio de Agricultura Republica de Colombia (Colombia., 2018)

2.5.2 Área, Producción y Rendimiento. El departamento de Santander cuenta con una ventaja a nivel nacional que es el rendimiento de sus cultivos de caña. Según la Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano, el departamento de Santander, para el 2017 contaba con 39.937 ha de cultivos de caña panelera, de la cual se estima una producción de 271.259 t de Panela, con un rendimiento del 6,79 t/ha; siendo este el mayor rendimiento promedio del país.

lo que hace que Santander sea el mayor productor de panela en Colombia, superado en área sembrada solo por Cundinamarca y Antioquia.(Colombia., 2018) El cultivo a pesar de las condiciones climáticas se ha mantenido estable y su orden de producción no ha variado significativamente.

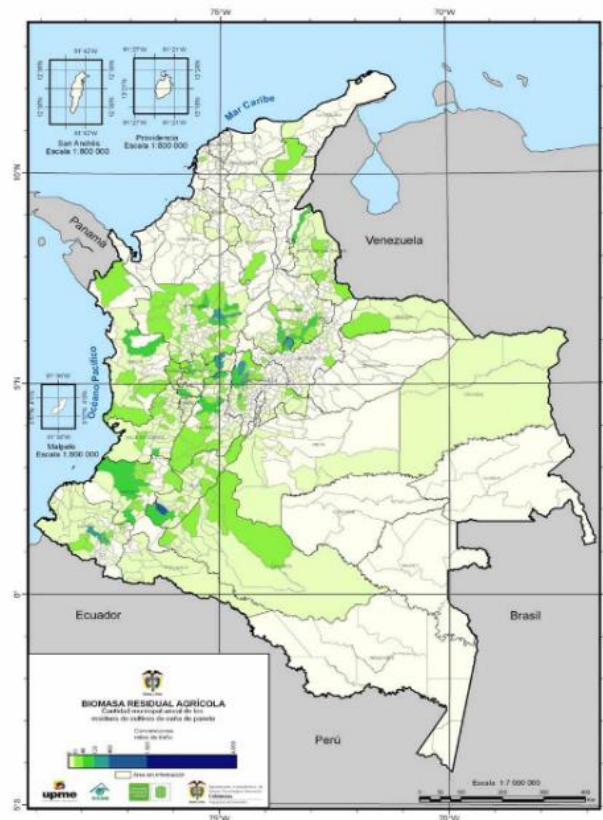


Figura 8 Cantidad municipal anual de los residuos de cultivo de caña panelera. Extraída de Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia (Escalante Hernández et al., 2007)

Los departamentos de Cundinamarca y Antioquia registran un área sembrada de 60.315 y 55.007 ha respectivamente, con una producción de 187.856 t de panela para Cundinamarca y 160.795 t para Antioquia lo que arroja rendimientos del 3,11 y 2,92 t/ha para cada departamento(Colombia., 2018).

La Hoya del Río Suárez es una zona de producción conformada por 13 municipios (5 pertenecientes a Boyacá y 8 al departamento de Santander), de los cuales se destaca el municipio de Barbosa, donde se estima que existen 19.792 ha sembradas, con una producción de 180.871 t de panela al año, generando 1'135.870 t de residuos, los cuales comprenden el bagazo, las hojas y cogollo de la caña.(Escalante Hernández et al., 2007)

Gracias al potencial agrícola del país, la biomasa residual del cultivo de caña es una opción para ser utilizada como materia prima para materiales puzolánicos que reduzca el uso de cemento en la industria de la construcción.

3 Materiales y metodología

En este capítulo se describen detalladamente los diferentes materiales utilizados en el trabajo, así como las diferentes metodologías implementadas. En la Figura 9 se presenta un esquema de las diferentes etapas desarrolladas durante este proyecto.

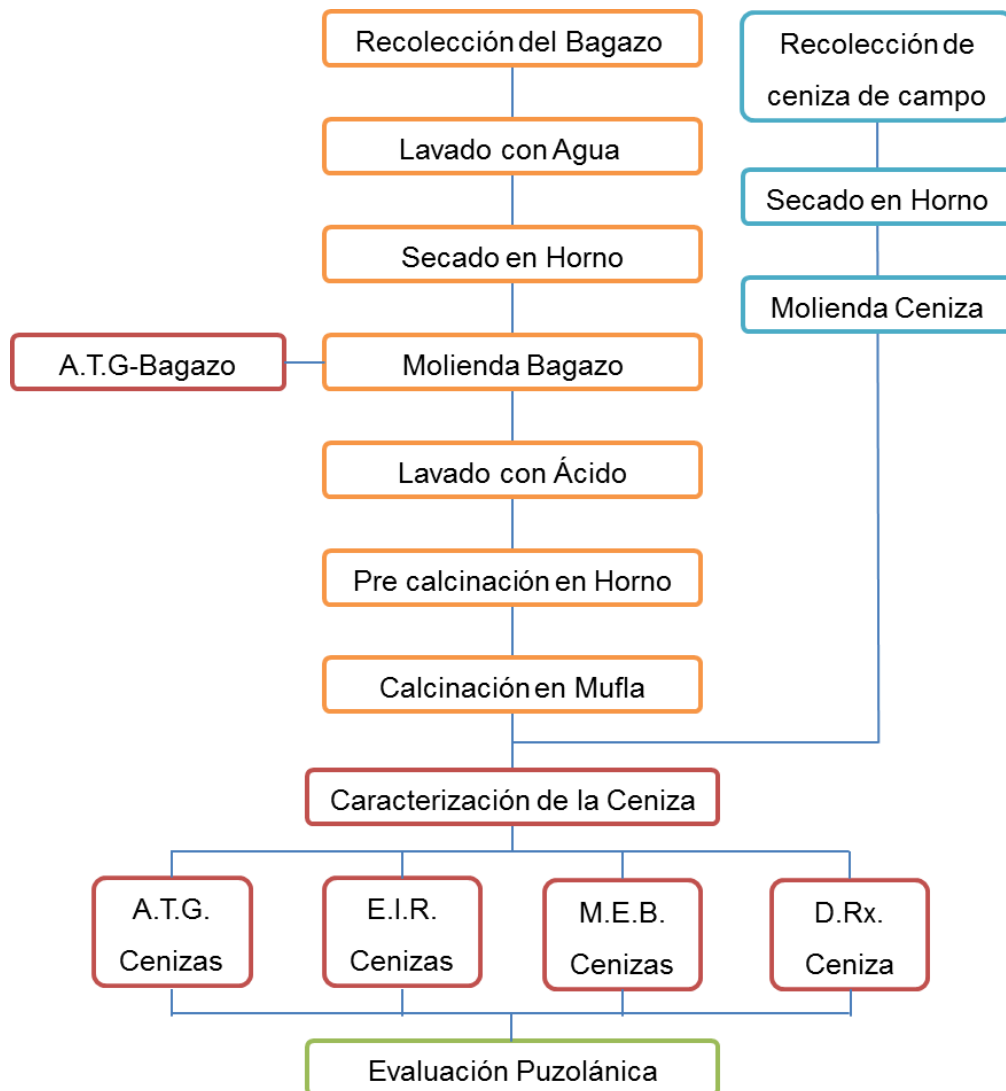


Figura 9 Diagrama del programa experimental

3.1 Materiales

3.1.1 Cemento Portland. Para el desarrollo de este trabajo fue utilizado cemento *Portland* de la marca CEMEX, definido como cemento hidráulico de uso general (Ver Apéndice A)

Entre sus usos frecuentes se encuentran: morteros, hormigón y elementos prefabricados. (Ver Figura 10a)

La densidad del cemento fue determinada en el Laboratorio de Caracterización de Materiales de Construcción de la Escuela de Ingeniería Civil según la Norma Técnica Colombiana NTC 221.

3.1.2 Arena. Para el agregado fino del mortero de recubrimiento fue utilizada arena fina de río de la empresa Transmateriales S.A. ubicada en la ciudad de Cúcuta (Norte de Santander). Es un producto para morteros de recubrimiento y mampostería. (Figura 10b, Apéndice B). El análisis por tamizado para el agregado fino fue realizado en el Laboratorio de Caracterización de Materiales de Construcción de la Escuela de Ingeniería Civil según la Norma Técnica Colombiana NTC 77



Figura 10 (a) Cemento, (b) Arena, (c) Agua

3.1.3 Agua. Para el desarrollo de este trabajo fue utilizada agua del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, es habitual su uso en obras de construcción en el área metropolitana de Bucaramanga, se usa para el mezclado de morteros y concretos, por su reconocida calidad fisicoquímica y microbiológica no fue necesario el análisis químico para su aceptación en este estudio. (Ver Apéndice C y Figura 10c).

3.1.4 Bagazo de caña y ceniza de bagazo de caña. El bagazo de caña de la producción de panela fue recolectado en el trapiche San Cristóbal (Ver Figura 11), ubicado en Piedecuesta, departamento de Santander ($6^{\circ}59'48.2''N$ $73^{\circ}02'40.0''W$) a 1070 metros sobre el nivel del mar aproximadamente y con una temperatura generalmente entre $20^{\circ}C$ y $26^{\circ}C$. Este trapiche produce normalmente 500 cajas de panela por hectárea, alrededor de 1 tonelada por hectárea según su propietario Álvaro Acero.

Allí mismo se encuentra la hornilla donde fue recolectada la ceniza producto de la combustión no controlada de una mezcla de bagazo y madera seca de la zona.



Figura 11 Depósito del trapiche San Cristóbal

3.2 Metodología

3.2.1 Recolección del material. El bagazo recogido en el trapiche es un material heterogéneo y con humedad variada dependiendo de la zona del montículo donde se extraiga, fue recolectado de la parte superior e inferior, tanto externa como interna para obtener una muestra significativa del depósito. El bagazo fue empacado en seis sacos de polipropileno de alrededor de 6 kilogramos cada uno y se almacenaron en un lugar seco y a temperatura ambiente.



Figura 12 (a) Depósito de bagazo, (b) Depósito de ceniza.

La ceniza recolectada de la hornilla es un material granular, frágil, de color oscuro. Se deposita después de la horneada al ambiente en montones sin un propósito definido. Se tomaron muestra de la parte superficial y del interior del cúmulo. La ceniza se empacó en tres bolsas plásticas de cierre hermético de aproximamiento 500 gramos cada una y se almacenaron en un lugar seco y temperatura ambiente.

3.2.2 **Pretratamiento del material.** A partir del bagazo y la ceniza recolectada, fueron preparadas diferentes muestras de cenizas bajo diferentes metodologías de pretratamiento. Las muestras analizadas incluyen las cenizas recolectadas en la hornilla del trapiche (CBC); las cenizas recolectada en la hornilla del trapiche con tratamiento térmico para garantizar su combustión completa (CBCT); y por último las cenizas producidas por la combustión del bagazo de forma controlada en el laboratorio (CBL).

3.2.2.1 **Lavado del bagazo.** Para la preparación de las cenizas CBL fue limpiado inicialmente el bagazo con agua a presión para eliminar la mayoría de las partículas grandes de material contaminante como: tierra, insectos y polvo. Fue utilizado un tamiz estándar según la ASTM E-11, No. 18 (Abertura 1 mm) marca SARGENT-WELCH SCIENTIFIC COMPANY, para evitar una pérdida elevada del material en el lavado. Ver Figura 13. El exceso de agua en el bagazo fue disminuido prensándolo en un tamiz de tela.



Figura 13 (a) Tamiz; (b) Bagazo.

3.2.2.2 **Secado del bagazo.** En un horno marca BINDER (modelo ED 23) del Centro Integrado de Laboratorios de Ingeniería Química, el bagazo fue secado durante 24 horas a una temperatura de 100°C. Con estas condiciones de tiempo y temperatura el material fue secado por completo. El secado fue realizado para facilitar el proceso en el molino de cuchillas. En la Figura 14b, se observa el bagazo después del secado.



Figura 14 (a) Horno; (b) Bagazo Seco

3.2.2.3 **Molienda del bagazo.** El bagazo fue procesado en un molino de cuchillas marca Wiley Mill, (Standard Model N°3, Pittsburgh, PA, EE. UU.) del Laboratorio de Procesos de Ingeniería Química como el mostrado en la Figura 15a.

El material fue picado en primera estancia hasta obtener un tamaño de partícula menor de 2 mm como se muestra en la Figura 15b, luego hasta alcanzar un tamaño menor de 1 mm como en la Figura 15c. Este tamaño de partícula fue escogido para tener una mayor superficie de contacto en la agitación con ácido.



Figura 15 (a) Molino de Cuchillas; (b) Partículas tamiz 2 mm; (c) Partículas tamiz 1 mm

3.2.2.4 Agitado de bagazo en medio ácido. El bagazo molido fue agitado en una solución de ácido clorhídrico fumante marca Merck, con una concentración 0,5 Molar, durante 6 horas a 200 RPM. Se utilizó un agitador vertical de la marca LIGHTNIN (modelo L5U08) del Laboratorio de Procesos de Ingeniería Química Figura 16a. El agitado en medio ácido fue realizado para eliminar impurezas como Fe, Na, K, Al, Ca, principalmente (Arcos, Pinto, & Rodríguez Páez, 2007). Posteriormente fue lavado con agua del acueducto hasta obtener pH próximo al neutro. Después del lavado fue secada la muestra igual que en 3.2.2.1

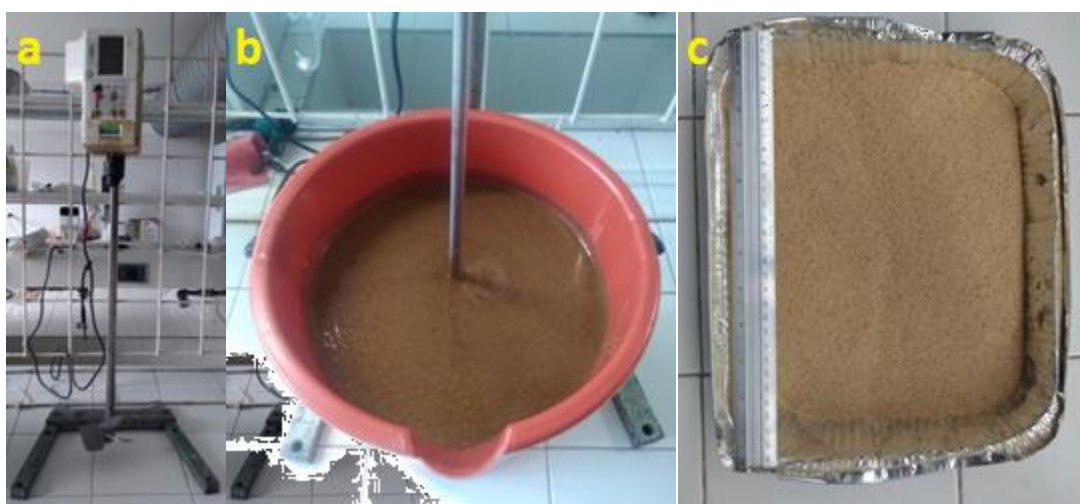


Figura 16 (a) Agitador vertical; (b) Agitación; (c) Bagazo molido después de la agitación.

3.2.2.5 **Calcinación de bagazo.** En el presente trabajo fueron comparadas las cenizas de caña de azúcar panelera obtenidas en condiciones controladas (CBL) versus las cenizas producidas en la combustión de un trapiche tradicional (CBC y CBCT).

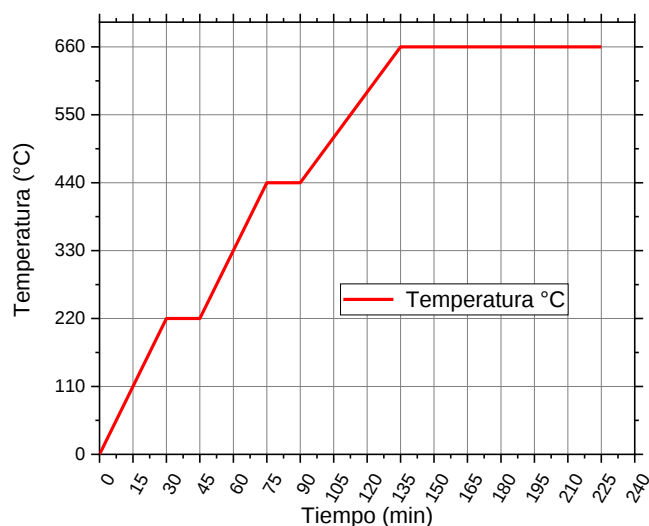


Figura 17 Rampa temperatura de la mufla.

Debido a la alta cantidad de cenizas necesarias para realizar los experimentos, la preparación de esta fue realizada en dos etapas. En primer lugar, el bagazo molido y tratado con ácido fue pre-calcinado en un horno alimentado por madera durante 3 horas en ausencia de llama, resultando en un material carbonoso como mostrado en la Figura 18a. Este proceso fue realizado para eliminar la mayor cantidad de volátiles livianos y reducir el volumen de material inicial.

En la segunda etapa, fue realizada la calcinación a temperatura controlada en el Laboratorio de Procesos de Ingeniería Química. Para esto, el material fue colocado en una mufla multipropósito marca Terrigeno (modelo D8), Figura 18b, durante 225 minutos alcanzando una temperatura de 660°C como se muestra en la Figura 17, temperatura inferior a 700°C, donde su estructura cambia de amorfa a cristalina (Rodrigues, 2012).

Una fracción de la ceniza recolectada en la hornilla (CBC) se sometió a la misma rampa de temperatura para completar su combustión (CBCT).



Figura 18 (a) Ceniza pre calcinada; (b) Mufla; (c) Ceniza calcinada.

3.2.2.6 Molienda de las cenizas de bagazo. La ceniza obtenida de la calcinación en la mufla (CBL) se tamizó según la NTC 77 para conocer su granulometría. Asimismo, la ceniza CBC presentaba un tamaño de partícula heterogéneo y no recomendado para morteros. Por tal motivo, un molino de bolas marca Paulo Abbe (Little Falls, New Jersey) del Laboratorio de Procesos de Ingeniería Química fue utilizado para la reducción y homogenización del tamaño de partícula. El molino fue cargado con 20 y 40 cuerpos cerámicos esféricos y diámetros de 5 y 2 cm, respectivamente, durante unas 4 horas.

La ceniza obtenida de la calcinación en la mufla (CBL) se tamizó según la NTC 77 para conocer su granulometría. Asimismo, la ceniza CBC presentaba un tamaño de partícula heterogéneo y no recomendado para morteros. Por tal motivo, un molino de bolas marca Paulo Abbe (Little Falls, New Jersey) del Laboratorio de Procesos de Ingeniería Química fue utilizado para la reducción y homogenización del tamaño de partícula. El molino fue cargado con 20 y 40 cuerpos cerámicos esféricos y diámetros de 5 y 2 cm, respectivamente, durante unas 4 horas.

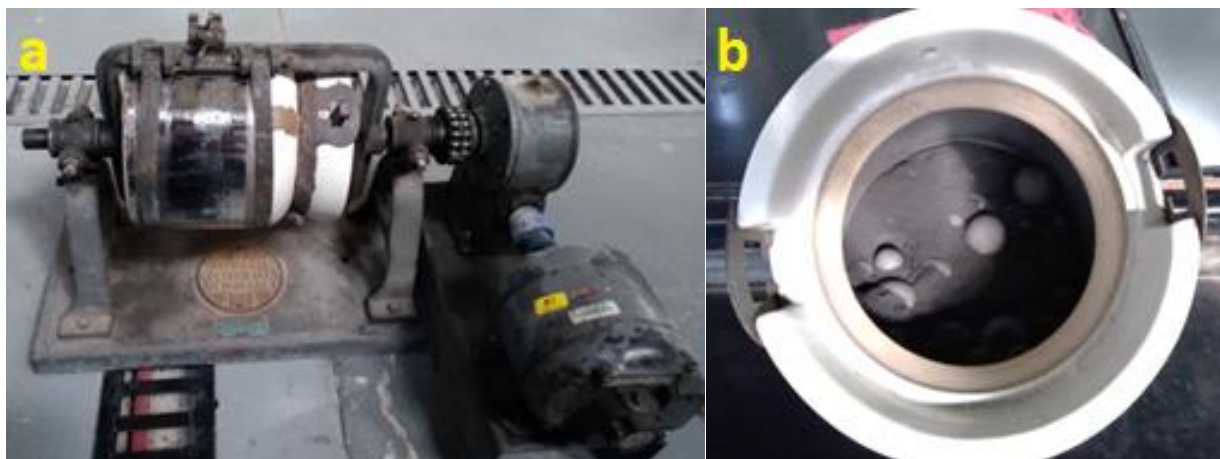


Figura 19 (a) Molino; (b) Cuerpos moledores

3.2.3 Caracterización Fisicoquímica de las Cenizas de Bagazo. Para conocer el contenido y la estructura cristalina del Sílice (SiO_2) presente en las cenizas estudiadas y su actividad puzolánica, las muestras fueron caracterizadas con los siguientes análisis.

3.2.3.1 Análisis termogravimétrico. La Termogravimetría (TG) se basa en la medida de la variación de la masa de una muestra cuando es sometida a un programa de temperatura en una atmósfera controlada («El análisis termogravimétrico (TG) y térmico diferencial (DTA) | QuimiNet.com», s. f.).



Figura 20 (a) Analizador Termogravimétrico; (b) Crisol con la muestra.

Muestras de bagazo procesado con tratamiento y sin tratamiento químico, fueron analizadas para encontrar el rendimiento de cenizas del material y sus etapas de degradación térmica. El análisis termogravimétrico permite identificar las etapas de descomposición y volatilización de los compuestos orgánicos. Este análisis fue realizado en un analizador termogravimétrico TGA marca TA Instruments (modelo 5500 Discovery) del Centro Integrado de Laboratorios de Ingeniería Química, Figura 20a, utilizando crisoles de cromo-platino Figura 20b, desde temperatura ambiente hasta 830°C a una velocidad de calentamiento de 40°C/min en una atmosfera de aire sintético. Cada muestra fue de 10 ± 1 mg.

3.2.3.2 ***Espectrometría de absorción infrarroja.*** Esta técnica proporciona un espectro de reflexión de las bandas de los grupos funcionales de las sustancias inorgánicas y orgánicas, por lo cual es posible realizar una identificación de los materiales («ANDREAH», s. f.).

En el caso de estudio para tener una idea más clara sobre la muestra de ceniza y su composición, se procedió a realizar un análisis de infrarrojo de la muestra con el fin de obtener información de su composición, utilizando un Espectrofotómetro de Infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), marca Shimadzu (modelo IRTracer-100) con sistema de Reflectancia Total Atenuada (ATR) celda de diamante y seleniuro de cinc del Centro Integrado de Laboratorios de Ingeniería Química, como se muestra en la Figura 21.

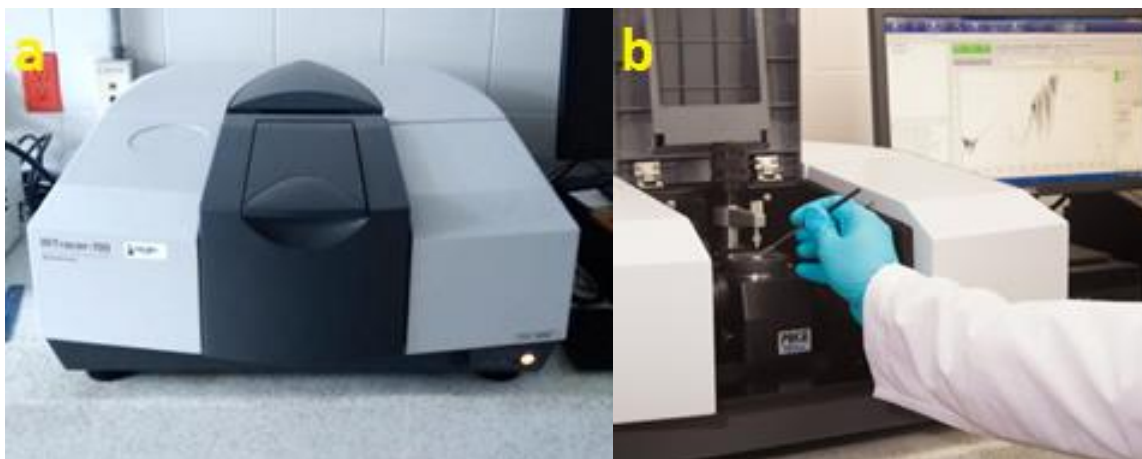


Figura 21 (a) Espectrofotómetro de Infrarrojo; (b) Ubicación de la muestra

3.2.3.3 **Microscopía electrónica de barrido.** Es una técnica de microscopía que permite la observación y caracterización superficial de materiales orgánicos e inorgánicos, entregando imágenes de alta resolución de la superficie de la muestra gracias a las interacciones de los electrones con la materia («Microscopía de Barrido de Electrones (MEB) – Vicerrectoría de Investigaciones», s. f.).

La microscopía electrónica de barrido fue utilizada para analizar la morfología y composición de las cenizas. Las muestras de ceniza se colocaron sobre porta muestras metálicos con cinta adhesiva. Debido a la baja conductividad de las cenizas fue necesario realizar un recubrimiento con carbono para evitar las distorsiones por la acumulación de carga eléctrica en la superficie.



Figura 22 (a) Microscopio Electrónico de Barrido; (b) Ubicación de la muestra

Las micrografías y los análisis de composición fueron realizados en un Microscopio Electrónico de Barrido marca FEI (QUANTA FEG 650) del Parque Tecnológico Guatiguará y un detector EDAX APOLO X con resolución de 126,1 eV para realizar análisis EDS. La espectrometría de energía dispersiva EDS realizada por este detector permitió determinar la composición elemental de la muestra, que posteriormente fue transformada en los óxidos más comunes para su interpretación.

Fueron realizadas tres repeticiones para cada muestra de cenizas en diferentes áreas (con alta heterogeneidad morfológica) y con magnificación de 600x. A partir de estos datos tomados en diferentes partes del porta muestras fue determinado un valor promedio de la composición.

3.2.3.4 Difracción de Rayos X. La difracción de rayos X (DRX) es una de las técnicas más eficaces para el análisis cualitativo y cuantitativo de fases cristalinas de cualquier tipo de material, tanto natural como sintético.

La difracción de rayos X es un fenómeno físico que se produce al interactuar un haz de rayos X, de una determinada longitud de onda, con una sustancia cristalina («CAI de Técnicas Geológicas», s. f.).

Para obtener información de la estructura cristalina de las muestras de ceniza fue realizado un análisis de difracción de rayos X, en un Difractómetro de Rayos-X marca Bruker (D8 Advance) del Parque Tecnológico Guatiguará. Los experimentos fueron realizados utilizando una fuente de Rayos X ($\text{CuK}\alpha=1,5406 \text{ \AA}$) con 40 kV y 40 mA, paso de $0,02035^\circ (2\theta)$, tiempo por paso 0,6 s y rango de medida de 2° a $70^\circ (2\theta)$. Las fases cristalinas fueron identificadas con el software X'Pert HighScore Plus.

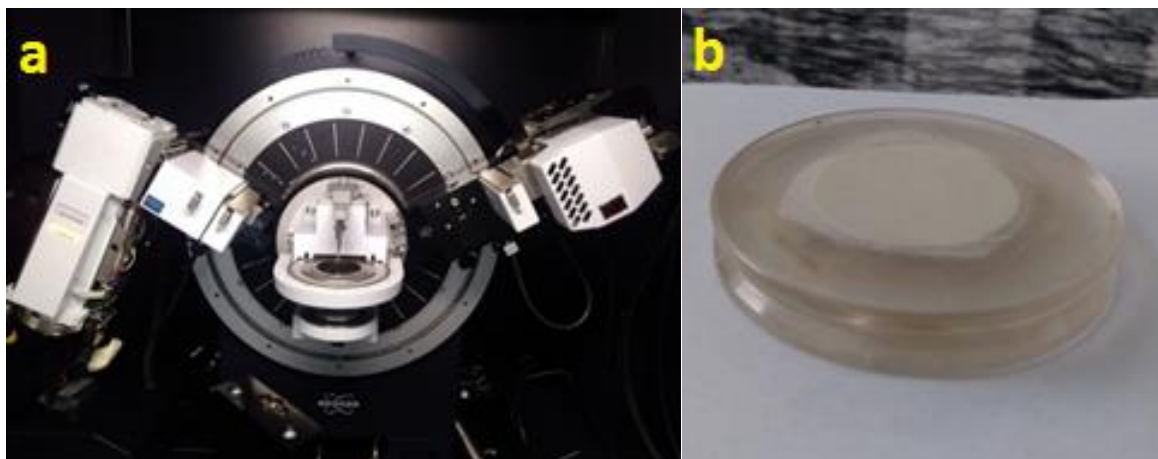


Figura 23 Difractómetro de Rayos-X; (b) Porta muestra con ceniza.

3.2.3.5 Análisis Granulométrico de las cenizas de bagazo. La granulometría de las cenizas fue realizada según la Norma Técnica Colombiana NTC 77. Esta norma abarca la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados finos y gruesos, a través de un proceso de tamizado (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2010).

Fue utilizada una tamizadora portátil marca TYLER (modelo RX-24) y un conjunto de tamices estándar según la ASTM E-11 marca J. BOLAÑOS del Laboratorio de Procesos de Ingeniería Química (ver Figura 24)

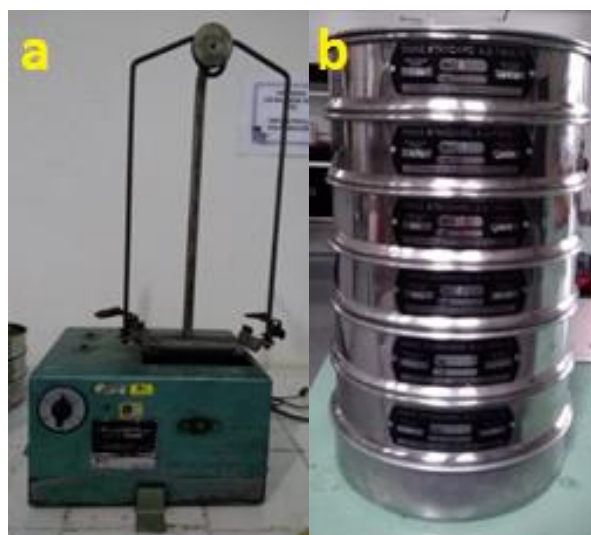


Figura 24 (a) Tamizadora; (b) Conjunto de tamices

3.2.3.6 **Determinación de densidad del cemento y las cenizas.** La densidad del cemento fue determinada según la Norma Técnica Colombiana NTC 221. Esta norma establece el método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico, aunque la Norma Técnica Colombiana NTC 1788 la recomienda para determinar las densidades de los materiales a comprar su actividad puzolánica (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 1999).

Fueron utilizados frascos de *Le Chatelier* marca Vidrio equipos y kerosene del Laboratorio de Caracterización de Materiales de Construcción de la Escuela de Ingeniería Civil.



Figura 25 (a) Frasco con kerosene; (b) Frasco con kerosene y ceniza de campo

3.2.4 **Caracterización de los Morteros.** Para conocer el comportamiento de los morteros con las cenizas agregadas, tanto en estado fresco como endurecido, se caracterizaron las muestras con los siguientes análisis.

3.2.4.1 ***Determinación de la fluidez de los morteros.*** La Norma Técnica Colombiana NTC 111 fue utilizada para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico. Esta norma especifica los requisitos que debe tener la mesa de flujo y establece el método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), s. f.).

Fue utilizada una mesa de flujo manual marca HUMBOLDT MFG CO (Modelo 362-S) del Laboratorio de Caracterización de Materiales de Construcción de la Escuela de Ingeniería Civil. Para las mezclas con remplazo de CBL, CBC, CBCT y el Mortero de Referencia (REF), se buscó una fluidez del 110 ± 5 como lo indica la NTC 1784.

La cantidad de ceniza utilizada en los morteros se determinó, según la NTC 1784, con una relación de densidades multiplicada por una constante como se muestra en la Ecuación (8)

$$X \text{ g de puzolana} = 87,5 \frac{\text{Densidad de la puzolana}}{\text{Densidad del cemento}} \quad (8)$$



Figura 26 (a) Mesa de flujo y anillo; (b) Mesa de flujo y calibrador

3.2.4.2 **Determinación de la actividad puzolánica.** La actividad puzolánica fue determinada según Norma Técnica Colombiana NTC 1784. Esta norma tiene por objeto establecer el método de ensayo para determinar el índice de actividad puzolánica de la puzolana o del material puzolánico de un cemento, en función de su contribución a la resistencia a la compresión de un mortero (Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificación (ICONTEC), 2001).

El método se basa en establecer la relación entre la resistencia a la compresión de un mortero de referencia, preparado con el cemento *Portland* que será utilizado como base para la fabricación del cemento puzolánico y de un mortero preparado con el mismo cemento y el material puzolánico en ensayo (Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificación (ICONTEC), 2001)

En la Figura 27 se muestran los moldes de las probetas para el ensayo de las cenizas y el mortero de referencia. En la Figura 28 se muestra la maquina universal de ensayos utilizada, marca ALFRED J. AMSLER Y CIA. (Modelo 79/191) de Schaffhausen – Suiza del Laboratorio de Caracterización de Materiales de Construcción de la Escuela de Ingeniería Civil.



Figura 27 Cubos para ensayo de compresión



Figura 28 Máquina universal de ensayos

4 Resultados y Discusiones

4.1 Caracterización Fisicoquímica de la Ceniza

A continuación, se presentan los resultados de las diferentes técnicas utilizadas para la caracterización de las cenizas y del bagazo de caña de azúcar panelera.

4.1.1 **Análisis termogravimétrico.** Los resultados del análisis termogravimétrico realizado en las muestras de bagazo tratado (BCT) y bagazo sin tratar (BST) mostraron cinco etapas características de la descomposición de las biomásas lignocelulósicas (Manals, Penedo, & Ortega, 2011). En la Tabla 2 se describen las zonas mencionadas.

Tabla 2

Temperaturas de descomposición de materiales lignocelulósicos (Manals et al., 2011)

Zona	Temperatura [°C]	Descripción
I	< 100	Perdida de humedad
II	100-250	Descomposición de los extractables
III	250-350	Principalmente descomposición de la hemicelulosa
IV	350-500	Principalmente descomposición de celulosa y lignina
V	> 500	Principalmente descomposición de lignina

En la Figura 29(Izq.) se observa un termograma del BCT y BST.

En la primera etapa se observa una pérdida de la masa correspondiente a la humedad contenida en la muestra. En la segunda etapa se presenta la descomposición de los volátiles más livianos. En la tercera etapa se presenta una pérdida de masa dominada principalmente por la descomposición de la hemicelulosa y la celulosa. En la cuarta etapa la pérdida de masa se debe a la descomposición térmica de la celulosa y la lignina. En la quinta etapa se observa la descomposición residual de la lignina, dejando un residuo de cenizas a partir de 550 °C para ambas muestras. Las pérdidas de masa se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Porcentajes de pérdidas de la masa

Etapas	BCT [%M]	BST [%M]
I	9,3	7,5
II	9,0	5,2
III	51,9	60,4
IV	26,3	23,4
V	0,9	0,9
Ceniza	2,6	2,6

En la Figura 29 (Der) se observa la derivada de la curva termogravimétrica donde se aprecia que el tratamiento con ácido afecta levemente el contenido de celulosa del bagazo, reduciendo su pico principal ubicado en 322°C.

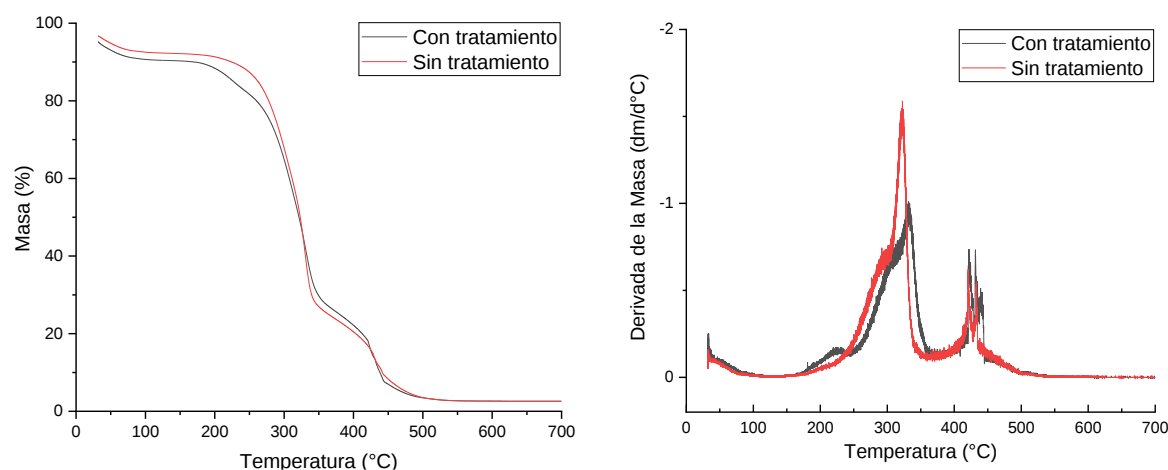


Figura 29 (Izq.) ATG del bagazo; (Der) Derivada del ATG del bagazo.

Teniendo en cuenta que el material se va a utilizar para recubrimiento de superficies, la presencia de compuestos combustibles sería un riesgo en caso de incendio.

Se realizaron análisis termogravimétricos a las cenizas obtenidas para descartar la presencia de materiales combustibles producto de la combustión incompleta. En la Figura 30 se observa que la CBL presenta una curva característica de pérdida de humedad, mientras que CBC presenta restos de celulosa y lignina perdiendo un 3% de masa.

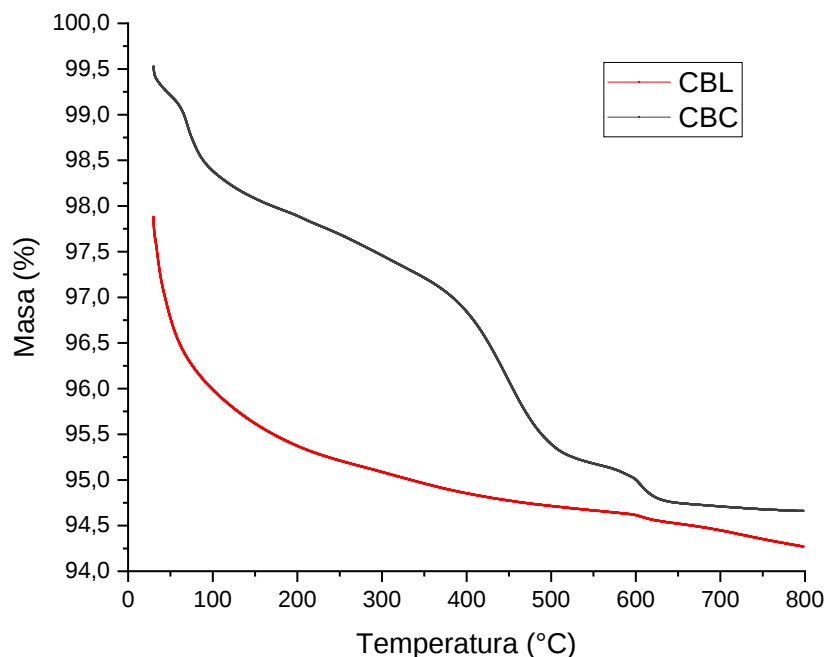


Figura 30 Curvas termogravimétricas de las cenizas

4.1.2 Microscopía electrónica de barrido. La Microscopía Electrónica de Barrido permitió observar una morfología heterogénea de las cenizas. En la Figura 31(Izq.) se presenta la superficie y la composición elemental del área de análisis de la muestra CBC en la Figura 31(Izq.). El elemento predominante en masa, después del carbono y oxígeno, es el silicio. Su morfología es granular.

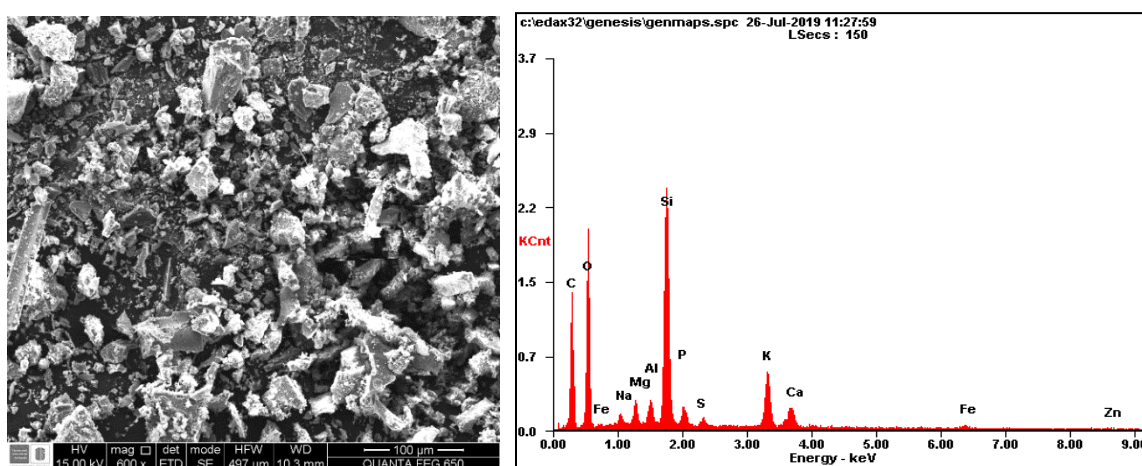


Figura 31 (Izq.) Imagen de CBC; (Der) Análisis elemental CBC

En la Figura 32 (Izq.) se presenta la superficie y la composición elemental del área de análisis de la muestra CBL en la Figura 32 (Izq.). El elemento predominante en masa, después del carbono y oxígeno, es el silicio igual que en CBC. Su morfología es granular.

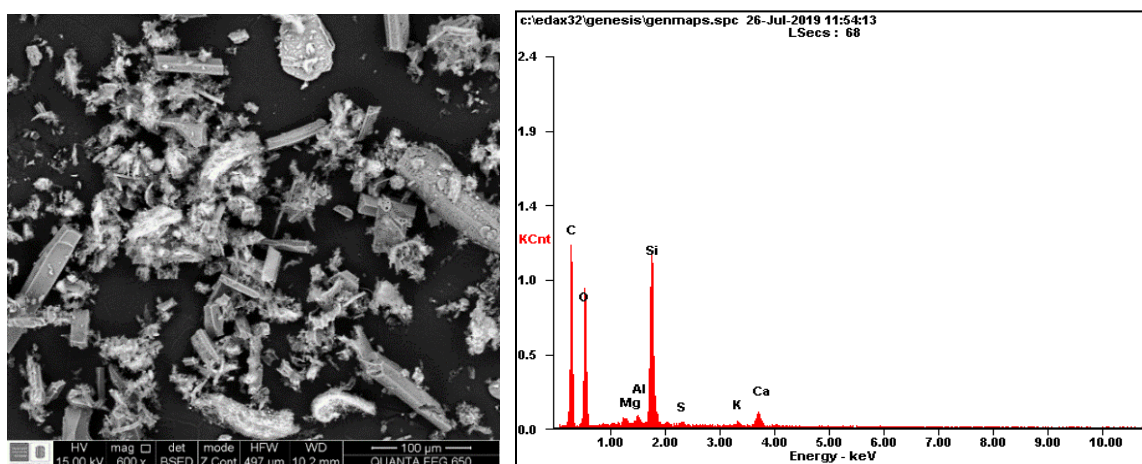


Figura 32 (Izq.) Imagen de CBL; (Der) Análisis elemental CBL

En la Tabla 4 se observan los valores promedio en masa de los óxidos presentes en las muestras de ceniza. Los resultados fueron normalizados excluyendo los valores de carbono, debido a la presencia de este elemento tanto en el recubrimiento, como en la cinta adhesiva del porta muestras.

Los óxidos de Zn, Fe, y Al presentes en CBC se deben posiblemente a impurezas minerales (polvo o tierra). Otros elementos pueden estar presentes en las cenizas debido a la combustión de madera y otros combustibles adicionales que usualmente se agregan a la hornilla del trapiche. Estos elementos no están presentes en la muestra CBL que tiene un procesamiento más controlado y que pueden ser eliminados por su disolución durante el lavado químico.

Una puzolana debe tener en su composición química al menos un 44% de SiO_2 (Rodriguez, 2012) Además debe tener un contenido mínimo de 50% en la suma SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3

(Rodrigues, 2012). Las cenizas estudiadas cumplen con la condición, aunque CBC se encuentra muy cerca al límite con 51% de SiO₂ y una suma de 60.55% de los óxidos requeridos.

Tabla 4

Composición química (% de óxidos) de las cenizas

Compuestos (%)	CBC	CBL	(Vidal, Torres, & González, 2014)	(Torres Agredo, Mejia de Guiterrez, Escandon Giraldo, & Gonzalez Salcedo, 2014)
SiO₂	51,38	84,97	66,07	67,05
CaO	7,84	9,47	3,40	3,85
K₂O	13,98	1,11	4,50	3,85
ZnO	5,36	-	-	-
P₂O₅	5,13	-	-	-
Fe₂O₃	4,97	-	5,57	5,55
Al₂O₃	4,20	1,65	8,70	6,00
MgO	3,62	1,42	2,93	2,75
SO₃	1,93	1,39	-	-
Na₂O	1,59	-	1,20	1,05

El porcentaje de óxido de silicio en las muestras de ceniza es similar a los encontrados en la literatura. Para el presente estudio es importante determinar si el óxido de silicio se encuentra de forma cristalina o amorfa, para lo cual se emplea la difracción de rayos X.

Los datos de las microscopías se encuentran en el Apéndice D.

4.1.3 Difracción de Rayos X. Las muestras analizadas presentan algunos picos que evidencia la presencia de estructuras cristalinas. Además, se observa que CBL presenta una mayor fracción de estructuras amorfas debido a un mayor desplazamiento de la línea base entre 15° y 35° como se muestra en la Figura 33. La cristalinidad de la ceniza está relacionada con el proceso de combustión del bagazo, dependiendo de la temperatura se formará cuarzo, cristobalita o tridimita (Salas, Castillo, Rojas, & Veras, 2012).

Tabla 5

Fases cristalinas identificadas en las cenizas

Muestra	Fases cristalinas de sílice
CBL	Quarzo (SiO_2)
CBC	Quarzo (SiO_2), Cristobalita (SiO_2)

La presencia de cristobalita en CBC indica que la temperatura de combustión del bagazo fue superior a los 800°C (Rodrigues, 2012; Vidal, Torres, González, et al., 2014), esta cristalinidad de la muestra hace que no reaccione con el hidróxido de calcio (CaO) y su actividad puzolánica sea baja.

Por otra parte, en CBL fue identificada solo una fase cristalina de óxido de silicio (quarzo), lo que indica una mayor proporción de material amorfo. Este estado desordenado es indicativo de mayor reactividad de las cenizas evaluadas.

Los detalles de la identificación se encuentran en el Apéndice E.

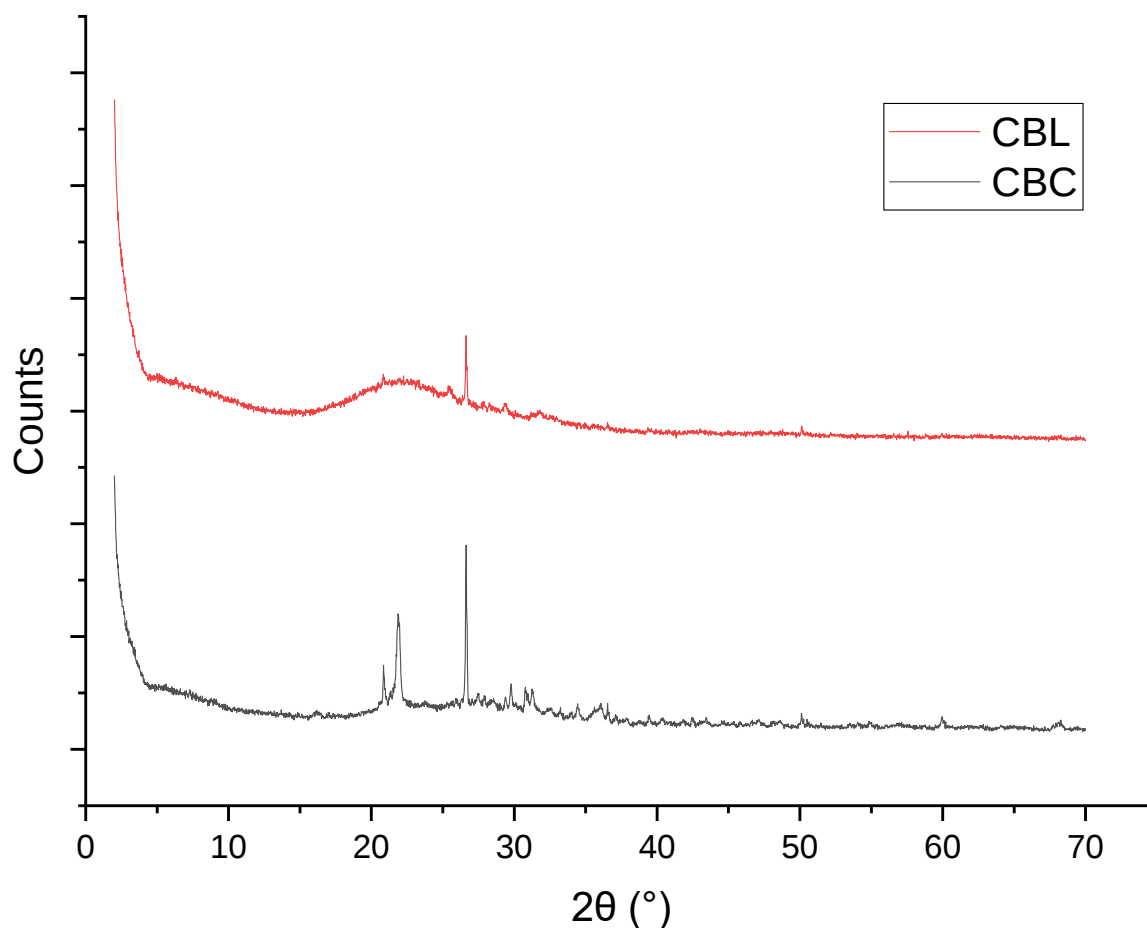


Figura 33 Difractogramas de las cenizas

4.1.4 **Espectrometría de absorción infrarroja.** Como se observó en la difracción de rayos x, las cenizas de bagazo de caña están constituidas mayormente por compuestos de naturaleza amorfa. Una técnica de caracterización para compuestos cristalinos y amorfos es la espectroscopía de absorción infrarroja, para el presente trabajo enfatizamos en el SiO_2 . Por este motivo se estudió también CBCT, presentó valores intermedios entre CBC y CBL de material amorfo.

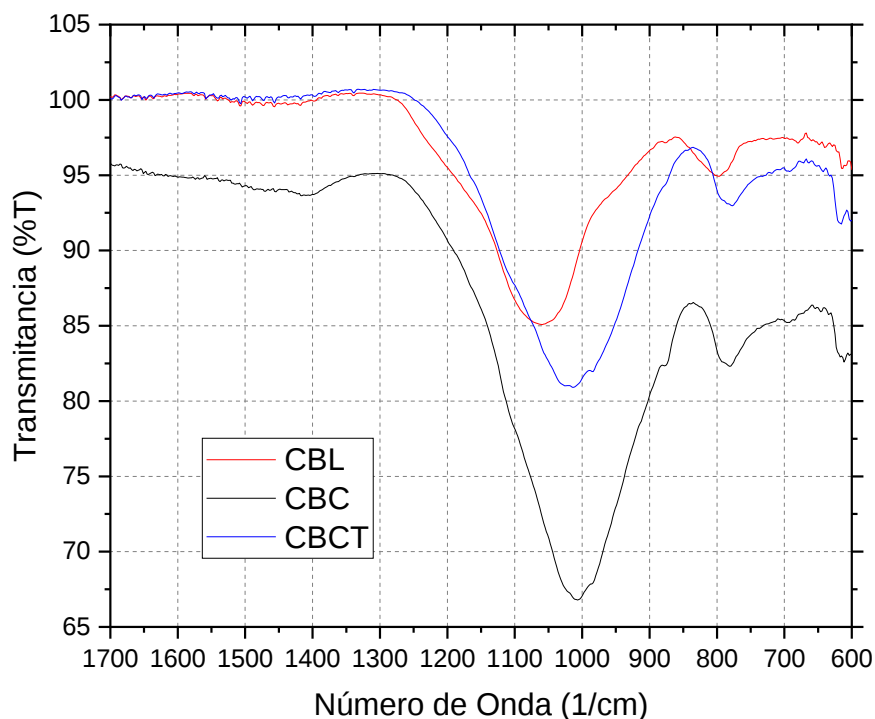


Figura 34 Espectro infrarrojo de las cenizas.

En la Figura 34 se observa el espectro infrarrojo de las cenizas, en el cual se pueden apreciar 2 bandas de absorción características del dióxido de silicio (SiO_2) (Morales & Pérez, 2003).

La zona de 900 a 1200 cm^{-1} corresponde a vibraciones de tetraedros de SiO_4 con un dominio de absorción más amplio para la CBC que para la CBL y CBCT, lo que indica que la muestra CBL y CBCT contiene una mayor cantidad de SiO_2 amorfo que la CBC (Salas et al., 2012).

La banda presente en 790 cm^{-1} corresponde a vibraciones de SiO_2 amorfo, presente de forma expedita en las tres muestras (Salas et al., 2012).

4.1.5 Análisis granulométrico. En la Figura 35 se muestran las granulometrías de las cenizas. La CBC obtenida de la hornilla tiene un tamaño de partícula muy grande y heterogénea, lo que no la hace adecuada para ser considerada como un agregado fino, para uniformar la muestra fue procesada en un molino de bolas mostrando una distribución de tamaños similar a la CBL.

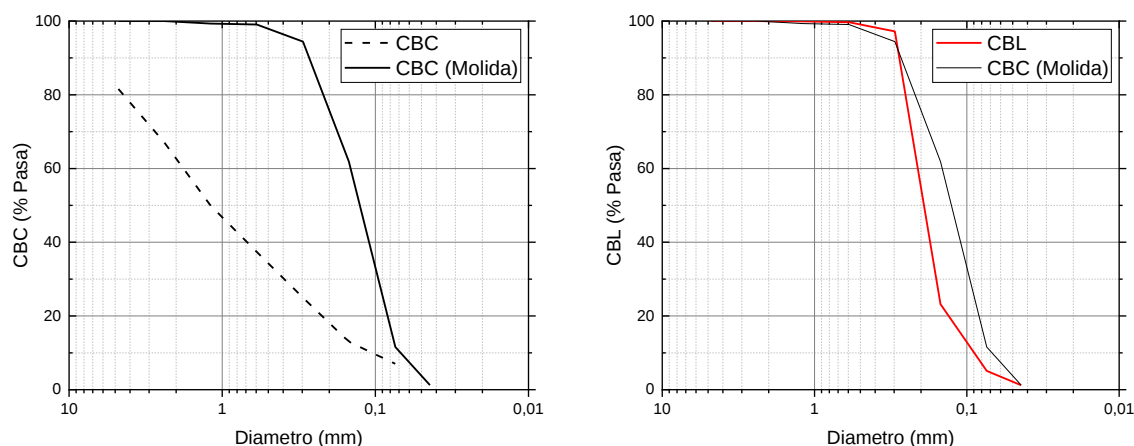


Figura 35 Granulometría cenizas

En la Figura 36 se observa la granulometría de la arena de río. La muestra presenta un módulo de finura de 1,91, que está dentro del de los parámetros de la NTC 2240 para agregados finos de origen natural ($1,75 < \text{Modulo de finura} < 2,83$).

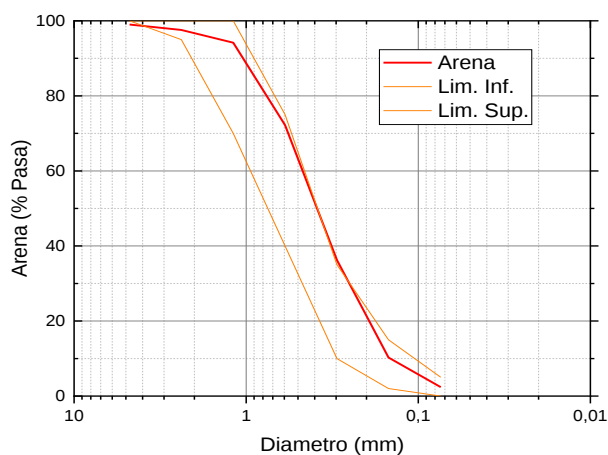


Figura 36 Curva granulométrica de la arena

Los detalles del análisis granulométrico se encuentran en el Apéndice F.

4.1.6 Determinación de la densidad del cemento y las cenizas. Se determinó la densidad de las cenizas como lo indica la NTC 221 y se rectificó con esta misma norma la densidad del cemento utilizado. En la Tabla 6 se observan las densidades de las muestras, siendo todas las cenizas menores a la densidad del cemento.

Tabla 6

Densidades de las cenizas y el cemento

Muestra	Densidad (g/cm³)
CBL	2,05
CBC	2,32
CBCT	2,50
Cemento	3,06

4.2 Caracterización de los morteros

A continuación, se presentan los datos obtenidos de los análisis hechos a las mezclas en estado fresco (Fluidez) y en estado endurecido (Actividad puzolánica como aporte a la resistencia a la compresión).

4.2.1 Determinación de la fluidez. En la Tabla 7 se observa en detalle la cantidad de ceniza y el volumen de agua para obtener la fluidez recomendada por la norma NTC 1784 para 3 cubos de cada muestra.

Tabla 7

Dosificación para fluidez 110±5 de las muestras

Muestra	Cemento (g)	X de puzolana (g)	Agua (ml)	Arena (g)	Relación A/C+Ceniza	Fluidez (110±5)
REF	250,0	0,0	180	687,5	0,72	111
CBL	162,5	58,6	220	687,5	1,00	110
CBC	162,5	66,3	197	687,5	0,86	108
CBCT	162,5	71,5	150	687,5	0,64	111

La muestra que más necesitó agua para alcanzar la fluidez recomendada por la norma fue la CBL, seguida por CBC y CBCT. Esto hace que la relación de agua/cemento+ceniza ($A/C+C$) sea la más alta también.

4.2.2 Determinación de la actividad puzolánica. La actividad puzolánica de los morteros como aporte a la resistencia a la compresión fue determinada como lo indica la NTC 1784. Fue determinado el Índice de Actividad Puzolánica (IAP) para un mortero de referencia con una resistencia a los 7 días de 9,08 MPa y de 18,96 MPa a los 28 días. Las resistencias obtenidas se muestran en la Figura 37.

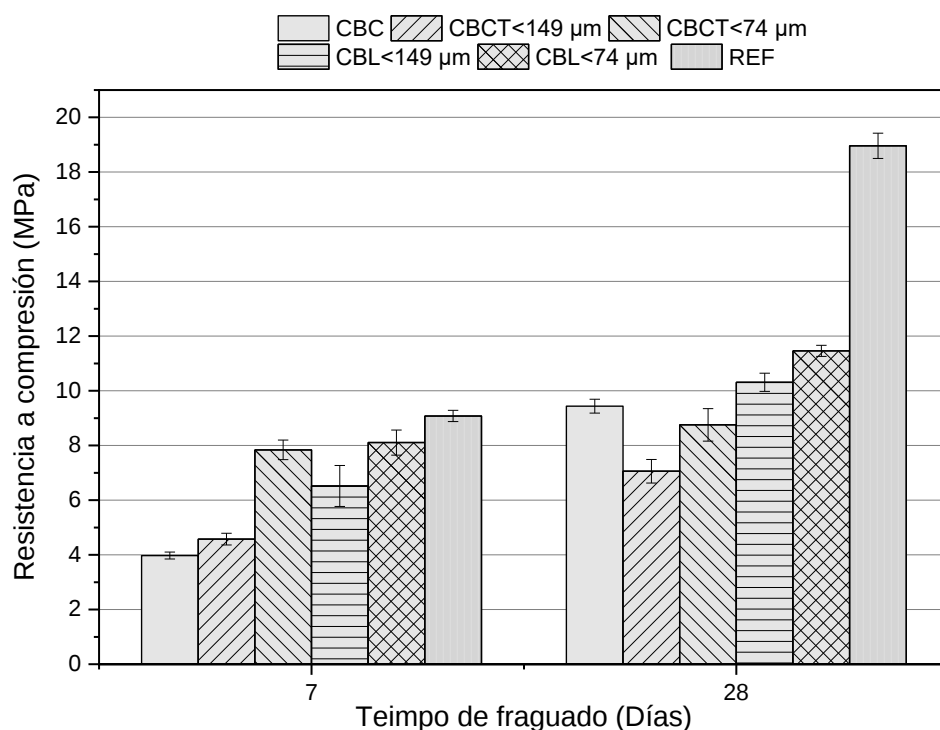


Figura 37 Resistencia a la compresión.

El IAP debe ser superior al 75% para ser considerado material puzolánico (Aguila & Sosa, 2008) se muestran los IAP en la Figura 38.

La muestra CBC presentó menos del 50% de IAP a los 7 y 28 días descartándola como material puzolánico.

La muestra CBCT de tamaño de partícula menor a 149 μm presentó un IAP del 50% a los 7 días, pero del 37% a los 28 días descartándola como material puzolánico. La muestra CBCT de tamaño de partícula menor a 74 μm mostró mejores resultados a los 7 días, 86% de IAP, pero a los 28 días su actividad se redujo a un 46% de IAP descartándola también como material puzolánico.

Los mejores resultados se obtuvieron de la muestra CBL. La muestra de CBL con tamaño de partícula menor a 149 μm obtuvo un IAP de 71% a los 7 días y de 54% de IAP a los 28 días. La muestra de CBL con tamaño menor a 74 μm presentó el mayor IAP a los 7 días con 89%. A los 28 días la muestra presentó un 60% de IAP, el más alto a los 28 días, sin embargo, al no ser superior o igual a 75% también se descarta como material puzolánico.

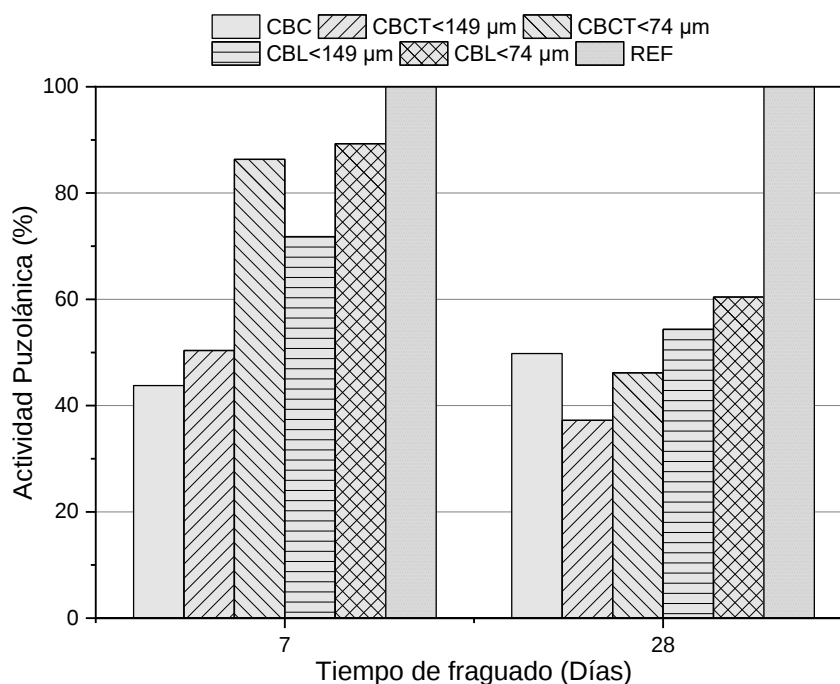


Figura 38 Índice de Actividad Puzolánica

4.2.3 Análisis de precios

El precio de los insumos y el funcionamiento de los equipos, a escala laboratorio, fue calculado para el proceso de un kilogramo de bagazo para CBL. No se tuvo en cuenta la depreciación de los equipos ni la mano de obra de los procesos. De un kilogramo de bagazo fueron obtenidos 26 gramos de ceniza, un rendimiento del 2,6% mostrado en el Análisis termogravimétrico.

El mayor costo se concentra en la calcinación y horno de secado por su alto consumo eléctrico. El ácido clorhídrico es el siguiente ítem en precio, por ser una sustancia contralada su costo es elevado. El resto de los procesos e insumos se encuentran por debajo de los 2500 pesos.

El costo total calculado para los 26 g de CBL fue de 78.676,18 COP.

El precio de CBC fue mucho más bajo debido a que fue utilizado únicamente el molino de bolas para su elaboración, el costo del molino fue de 3.916,14 COP por cada carga (500 gramos de CBC).

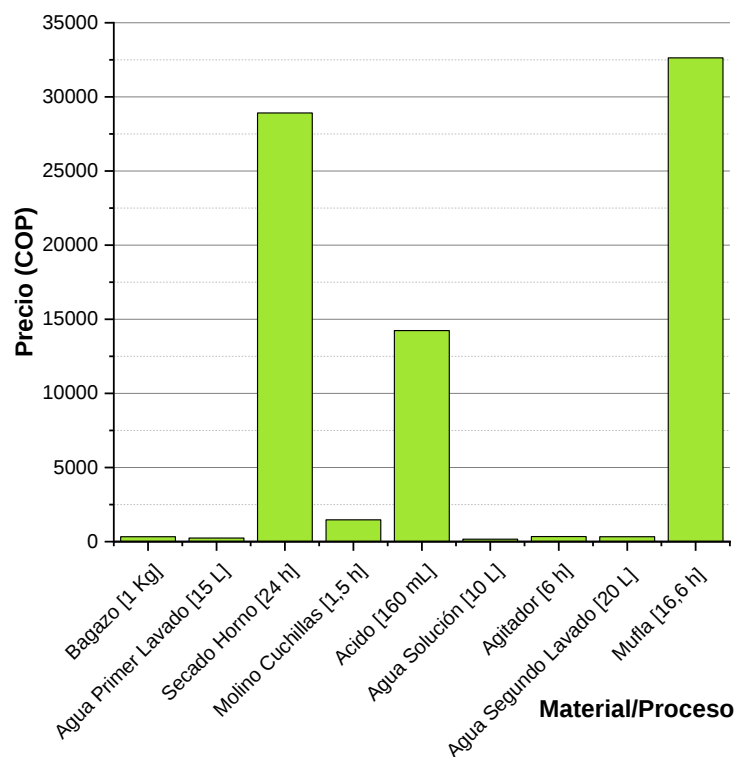


Figura 39. Precio para el proceso de 1 kg de bagazo para CBL

5 Conclusiones

Los diferentes resultados encontrados a lo largo de este estudio indican que:

El uso de las cenizas producidas por la combustión de bagazo de caña de azúcar panelera como aditivo en el mortero de recubrimiento (bajo las condiciones de mezcla de este trabajo), no cumplió los requisitos para ser consideradas como material puzolánico según su índice de actividad puzolánica.

La preparación de cenizas de manera controlada en laboratorio (CBL), evidenció una mayor proporción de estructura amorfa en comparación con las cenizas recolectadas en el trapiche. Igualmente, las cenizas CBL mostraron menor contenido de los elementos K, Zn, P, Fe, Al, Mg, Na, posiblemente debido al lavado químico.

La evaluación de los morteros mostró una mayor actividad puzolánica asociada a menores granulometrías de las cenizas.

Los altos porcentajes de sílice en las cenizas de bagazo de caña (mayores al 50 % en masa) cumplen con los requisitos de la norma ASTM C-618 para la clasificación de materiales puzolánicos. Sin embargo, la baja actividad puzolánica puede estar asociada a elevados tamaños de partículas en las cenizas o a su alta cristalinidad estructural.

Se apreció que las mezclas de mortero con ceniza presentaban una mayor demanda de agua para llegar a la consistencia requerida, lo cual tiende a disminuir su resistencia a la compresión.

Los procesos de secado y calcinación demandan una gran cantidad energía eléctrica, lo cual hace que la producción de ceniza con condiciones controladas de temperatura sea muy costosa.

6 Recomendaciones

Para futuros trabajos se recomienda:

Evaluar el efecto de la temperatura y tiempo de calcinación del bagazo de caña panelera en la actividad puzolánica de las cenizas.

Estudiar concentraciones diferentes de cenizas en las mezclas de mortero.

Estudiar mezclas de mortero con cenizas de granulometrías inferiores a 44 μm para mayor reactividad

Estudiar el efecto de las cenizas en la durabilidad de los morteros.

Evaluar otros métodos de secado y calcinación que consuman menos energía para disminuir los costos de producción.

Evaluar el efecto de morteros de recubrimiento con CBC de tamaño menor a 74 μm .

El bajo rendimiento de la producción de cenizas a partir de la combustión (2,6 %) debe ser considerado como un limitante para la caracterización de múltiples mezclas de mortero de recubrimiento. Esto debido a que es necesario procesar una gran cantidad de bagazo de caña para obtener la cantidad de ceniza necesaria para las pruebas.

Bibliografía

- Águila, I. (2011). CINCO ESTRATEGIAS DE ACERCAMIENTO A UN CONCRETO SOSTENIBLE. *Tecnología constructiva*, 1-15.
- Aguila, I., & Sosa, M. (2008). EVALUACIÓN FÍSICO QUÍMICA DE CENIZAS DE CASCARILLA DE ARROZ, BAGAZO DE CAÑA Y HOJA DE MAÍZ Y SU INFLUENCIA EN MEZCLAS DE MORTERO, COMO MATERIALES PUZOLÁNICOS. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 23, 55-66.
- ANDREAH. (s. f.). Recuperado 23 de noviembre de 2019, de http://www.fisica.unam.mx/andreah/tecnicas_equipos/ftir.html
- Arcos, C. A., Pinto, D. M., & Rodríguez Páez, J. E. (2007). La cascarilla de arroz como fuente de SiO₂. *Husk of rice as source of SiO₂*. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. N. o, 41, 7-20. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/430/43004102.pdf>
- Asociación de Productores de Cemento - ASOCEM. (2018). *PANORAMA MUNDIAL DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO*. Recuperado de [http://www.asocem.org.pe/archivo/files/Vision General de la Industria del Cemento y sus Principales Actores.pdf](http://www.asocem.org.pe/archivo/files/Vision%20General%20de%20la%20Industria%20del%20Cemento%20y%20sus%20Principales%20Actores.pdf)
- Avalos Esquivel, G. A., Saldaña Costa, A. F., & Farro Perez, N. (2013). *Efecto del contenido de sílice amorfa en la ceniza de la cáscara de arroz sobre la resistencia a la compresión en morteros de cemento portland y porosidad y abosorcion en concretos de cemento portland*. Universidad Nacional de Trujillo.

CAI de Técnicas Geológicas. (s. f.). Recuperado 23 de noviembre de 2019, de <https://www.ucm.es/tecnicasgeologicas/difraccion-de-rayos-x-drx>

Calderon Pelaez, L. F., Martinez Cabrera, S. I., Alvarado Quintana, H. M., & Vasquez Alfaro, I. E. (2017). *INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTICULA Y DEL PORCENTAJE DE REEMPLAZO DE CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR (CBCA) POR CEMENTO PORTLAND TIPO I SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION, ACTIVIDAD PUZOLANICA, Y REACTIVIDAD ALCALI-SILICE EN MORTEROS MODIFICADOS*. Universidad Nacional de Trujillo.

Colombia., M. de A. R. de. (2018). Agronet Resultados de búsqueda. Recuperado 14 de octubre de 2018, de <http://www.agronet.gov.co/Paginas/Resultados-de-busqueda.aspx?k=panela>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. (2019). *Boletín Técnico Estadísticas de Cemento Gris (ECG) Febrero 2019. Boletín técnico, educación formal 2019*.

Durán, J. R., Insuasty, O., & Viveros, C. A. (2014). Comportamiento agroindustrial de diez variedades de caña de azúcar para producción de panela en Santander , Colombia Agro industrial yield of ten sugar cane varieties for production of panela in Santander , Colombia. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15, 183-195. https://doi.org/https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num2_art:358

El análisis termogravimétrico (TG) y térmico diferencial (DTA) | QuimiNet.com. (s. f.). Recuperado 23 de noviembre de 2019, de <https://www.quiminet.com/articulos/el-analisis-termogravimetrico-tg-y-termico-diferencial-dta-20473.htm>

Escalante Hernández, H., Orduz Prada, J., Zapata Lesmes, H. J., Cardona Ruiz, M. C., & Duarte Ortega, M. (2007). *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*. Atlas

del Potencial Energetico de la Biomasa Residual en Colombia.

Federacion Interamericana del Cemento - FICEM. (2018). Infome Estadístico 2018. *Cemento & Concreto de Iberoamerica y el Caribe*, 5, 8-12.

Fritz Keil, P. (1973). *CEMENTO - FABRICACIÓN, PROPIEDADES, APLICACIONES*. (Editores Técnicos Asociados S.A, Ed.). Barcelona - España.

García Rincón, J. G., Toscano, J. A., & Guerrero Gómez, G. (2015). Análisis Exergético De Un Horno De Lecho Fijo En La Producción De Panela. *Revista Colombiana De Tecnologias De Avanzada (Rcta)*, 1(25). <https://doi.org/10.24054/16927257.v25.n25.2015.2361>

Gutierrez de Lopez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*.

Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificación (ICONTEC). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 111.

Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificación (ICONTEC). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 221 (1999).

Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificación (ICONTEC). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1784 (2001). COLOMBIA.

Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificación (ICONTEC). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 77, Annual Book of ASTM Standards § (2010). <https://doi.org/10.1520/C0136-06.2>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Energía de la biomasa. Manuales de Energia Renovables 2* (Vol. 67). Madrid.

Manals, E., Penedo, M., & Ortega, G. (2011). ANÁLISIS TERMOGRAVIMETRICO Y

TÉRMICO DIFERENCIAL DE DIFERENTES BIOMASAS VEGETALES. *Chemical Technology*, 31, 180-190.

Microscopía de Barrido de Electrones (MEB) – Vicerrectoría de Investigaciones. (s. f.). Recuperado 23 de noviembre de 2019, de <https://investigaciones.uniandes.edu.co/microscopio-electronico-de-barrido-meb/>

Montoya Tobon, L. M., & Tobon, J. I. (2009). *Evaluación Del Desempeño Del Cemento Pórtland Tipo III Adicionado Con Sílice De Diferentes Tamaños De Partícula*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

Morales, A., & Pérez, G. F. (2003). Caracterización por espectroscopía en el infrarrojo de óxidos de silicio depositados en ambiente de N₂O. *Superficies y vacío*, 16(2), 16-18.

Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2013). *Tecnologia do Concreto - 2ed* (2.^a ed.). Sao Paablo. Recuperado de <https://books.google.com.br/books?id=cqY5AgAAQBAJ>

Propiedades de los Morteros de Revestimiento | Construpedia, enciclopedia construcción. (s. f.). Recuperado 13 de marzo de 2019, de https://www.construmatica.com/construpedia/Propiedades_de_los_Morteros_de_Revestimiento

Rodrigues, M. S. (2012). *Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias*. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE.

Rodriguez, G., Garcia, H., Roa Diaz, Z., & Santacoloma, P. (2004). Producción de panela como estrategia de diversificación en la generación de ingresos en áreas rurales de América Latina. Producción de panela como estrategia de diversificación en áreas rurales de America Latina.

- Fao*, 98. Recuperado de http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/ags/publications/AGSF_WD6s.pdf
- Salas, J., Castillo, P., Rojas, M. I. S. D. E., & Veras, J. (2012). Use or rice husk ash an addition in mortar, 21-39. Recuperado de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/78242/1/888-1471-1-PB.pdf>
- Silva, O. J. (2017). ¿CÓMO SE PRODUCE EL PROCESO DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO? Recuperado 15 de abril de 2019, de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/proceso-hidratacion-del-cemento>
- Soria Santamaría, F. (2012). Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción. *Materiales de Construcción*, 33(190-191), 69-84. <https://doi.org/10.3989/mc.1983.v33.i190-191.974>
- Torres Agredo, J., Mejia de Guterrez, R., Escandon Giraldo, C. E., & Gonzalez Salcedo, L. O. (2014). Characterization of sugar cane bagasse ash as supplementary material for Portland cement Caracterización. *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 34(1), 5-10.
- Uchima Quintero, J. S. (2015). *Evaluación de la puzolanicidad de material obtenido en la calcinación simultánea de biomasa y arcilla caolinítica*. Universidad Nacional de Colombia - Medellin. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/52698/>
- Vidal, D. V., Torres, J., & González, L. O. (2014). Ceniza de bagazo de caña para elaboración de materiales de construcción: estudio preliminar. *Revista de Física*, 48E(48), 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.013>
- Vidal, D. V, Torres, J., González, L. O., Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Fairbairn, E. M. R., ... Zhang, Y. X. (2014). CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA PARA ELABORACIÓN DE

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN : ESTUDIO PRELIMINAR CANE BAGASSE ASH
FOR MANUFACTURE OF BUILDING MATERIALS: PRELIMINARY STUDY

Introducción. *Construction and Building Materials*, 4(48), 641-646.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.013>

Apéndices

Apéndice A. Cemento



 Descripción

 Beneficios

 Presentación ¹

✓ Para construcción en general. Ideal para la elaboración de morteros de pega, pañete y acabados.

✓ Sirve para la elaboración de concretos de comportamiento normal en fraguados y resistencias.

✓ Excelente manejabilidad por su alta retención de agua.

✓ Estabilidad en sus propiedades de resistencia y fraguado.

 Granel.

 Sacos de 50kg | 42.5 kg.

Ficha Técnica Cemento Hidráulico Uso General ³

Resistencia a compresión (MPa)	Método de ensayo	Rango de resultados	Requisitos de norma
1 día	NTC 220	8.0 – 13.0	No especificado
3 días	NTC 220	14.0 – 21.0	Mínimo 8.0
7 días	NTC 220	18.0 – 24.0	Mínimo 15.0
28 días	NTC 220	24.0 – 28.0	Mínimo 24.0

 **Innovación y sostenibilidad**

LEED®, ISO 14001:2015, Códigos de construcción sostenible

✓ Este cemento puede contener en su composición materiales regionales, reciclados y/o renovables. ²

✓ El embalaje de nuestros productos puede proceder de fuentes gestionadas responsablemente y/o estar certificado con algún sello ambiental.

✓ En nuestro informe anual de Desarrollo Sostenible podrá conocer los logros que hemos alcanzado en los temas prioritarios de Responsabilidad Social y Ambiental regido por las guías G4 del Global Reporting Initiative (GRI).

Otros parámetros físicos	Método de ensayo	Rango de resultados	Requisitos norma
Cambio de longitud por autoclave (%)	NTC 107	0.01 - 0.15	Máximo 0.80
Tiempo de fraguado inicial (min)	NTC 118	100 - 150	Mínimo 45, Máximo 420
Contenido de aire en volumen de mortero (%)	NTC 224	4 - 8	Máximo 12
Expansión de barra de mortero 14 días (%)	NTC 4927	0.000 - 0.016	Máximo 0.020

 **Certificaciones** ⁴






¹ La presentación de nuestros productos puede variar según la zona en la que se comercializa.

² El contenido de dichos materiales puede variar de acuerdo con su disponibilidad, el producto de algunas plantas puede no contenerlos.

³ Cumple la norma NTC 121 para Cemento UG.

⁴ Producto elaborado bajo Sistemas de Gestión certificados en Calidad ISO 9001 (reconocimiento nacional e internacional), y Seguridad y Salud (OHSAS 18001). Este producto se distribuye en una flota de vehículos certificada como Carbono Neutro.

Está totalmente prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización escrita de Cemex Colombia S.A. Cemex Colombia S.A. no se hace responsable por los daños directos, indirectos, especiales, incidentales o emergentes que se puedan ocasionar por el mal uso de sus productos o sin cumplir las normas técnicas aplicables. Los datos e instrucciones indicados en la presente ficha técnica están basados en experiencia y pruebas realizadas en los Laboratorios de Aseguramiento de Calidad de Cemex Colombia S.A. de acuerdo con las normas técnicas vigentes, y no constituyen ni forman parte de una oferta, adquisición o venta, ni suponen parte de ninguna relación contractual. Las condiciones y procedimientos de aplicación del cemento en concreto y mortero en la obra están fuera del alcance de Cemex Colombia S.A. Para obtener mejores resultados, se recomienda seguir las indicaciones y consultar a su Ejecutivo Comercial para obtener el apoyo y la asesoría correspondiente.

Apéndice B. Arena

tecnosuelos ltda.
INGENIERIA DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS

CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL
NORMA NTC 1495

CONTROL	: AGREGADO FINO PARA EL CONCRETO
SOLICITANTE	: TRANSMATERIALES S.A.
LOCALIZACION	: ANILLO VIAL ORIENTAL DIAGONAL A INTERFERIAS. CUCUTA, N. DE S.
DESCRIPCION	: ARENAS CON RESIDUOS DE TRITURACION (PLANTA TRANSMATERIALES S.A. / FUENTE RIO PAMPLONITA)
MUESTRA No.	: 1

FECHA: FEBRERO DE 2019

MUESTRA	PESO 1 gr	PESO 2 gr	PESO 3 gr	HUMEDAD %
1	2859	2780	152	3,01%

P1 - P2
HUMEDAD : Humedad natural del terreno $X = \frac{P1 - P2}{P2 - P3} \times 100$
P2 - P3

Observaciones: Ensayo realizado sobre muestra suministrada en fecha 19-02-19

Juan Rangel
Laboratorista:
J.C.R.R.

J.A.R.
Revisó:
Ing. Jhonny A. Rodríguez B.
Mat. Prof. No. 54202-373127

VERSION 1

OFIC. LAB.: AV. 3E No. 14A-17, LOS CAOËS. TEL/CEL 5712010 – 5712015 – 5718235 / 3166914865 – 3002156925 – 3187122429. CUCUTA, N. S.
tecnosuelosltda@gmail.com

tecnosuelos lta
INGENIERIA DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS

ANALISIS GRANULOMETRICO AGREGADO FINO PARA EL CONCRETO

NTC 77 / INV E 213-13

CONTROL	: AGREGADO FINO PARA EL CONCRETO				
SOLICITANTE	: TRANSMATERIALES S.A.				
LOCALIZACION	: ANILLO VIAL ORIENTAL DIAGONAL A INTERFERIAS. CUCUTA, N. DE S.				
DESCRIPCION	: ARENAS CON RESIDUOS DE TRITURACION (PLANTA TRANSMATERIALES S.A. / FUENTE RIO PAMPLONITA)				
MUESTRA No.	: 1	REF. NORMA	: INV ART. 630-13	FECHA	: FEBRERO D

GRADACION					
P ₁ =	2550,0	P ₂ =	2461,0	NORMA (%)	
Tamiz	Peso Retenido	% Retenido	% Pasa	Min.	Max.
3/8"	0,0	0,0	100,0	100	100
No. 4	198,0	7,8	92,2	95	100
No. 8	530,0	20,8	71,5	80	100
No. 16	430,0	16,9	54,6	50	85
No. 30	426,0	16,7	37,9	25	60
No. 50	617,0	24,2	13,7	10	30
No. 100	260,0	10,2	3,5	2	10
F	89,0	3,5			

Díámetro de la partícula (mm)

— Gradación de la muestra
— Norma INV ART. 630-13 (AF)

OBSERVACIONES: Ensayo realizado sobre muestra suministrada en fecha 19-02-19

Juan Rangel
Laboratorista:
J.C.R.R.

[Signature]
Revisó:
Ing. Jhonny A. Rodríguez B.
Mat. Prof. No. 54202-373127

F-AC-34
VERSION 1

OFIC. LAB.: AV. 3E No. 14A-17, LOS CAOBS. TEL/CEL 5712010 – 5712015 – 5718235 / 3166914865 – 3002156925 – 3187122429. CUCUTA, N. S.
tecnosueloslta@gmail.com

tecnosuelos ltda.
INGENIERIA DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS

DETERMINACION DEL EQUIVALENTE DE ARENA
INV E 133-13

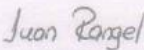
CONTROL	: AGREGADO FINO PARA EL CONCRETO		
SOLICITANTE	: TRANSMATERIALES S.A.		
LOCALIZACION	: ANILLO VIAL ORIENTAL DIAGONAL A INTERFERIAS. CUCUTA, N. DE S.		
DESCRIPCION	: ARENAS CON RESIDUOS DE TRITURACION (PLANTA TRANSMATERIALES S.A. / FUENTE RIO PAMPLONITA)		
MUESTRA No	: 1	REF. NORMA : INV ART. 630-13	FECHA: FEBRERO DE 2019

PRUEBA No.	1		
PROBETA No.	1	2	3
A (mm)	105,0	107,0	107,0
B (mm)	132,0	131,0	133,0
$C = \frac{A}{B} \times 100 (\%)$	79,5	81,7	80,5
PROMEDIO %	80,6		

A : LECTURA DE ARENA
B : LECTURA DE ARCILLA
C : EQUIVALENTE DE ARENA

ESPECIFICACION INV ART. 630-13 ≥ 60

OBSERVACIONES: Cumple requisitos de la Norma INV ART. 630-13
Ensayo realizado sobre muestra suministrada en fecha 19-02-19


Laboratorista:
 J.C.R.R.


Revisó:
 Ing. Jhonny A. Rodriguez B.
 Mat. Prof. No. 54202-373127

F-AC-10
VERSION 1

OFIC. LAB.: AV. 3E No. 14A-17, LOS CAOPOS. TEL/CEL 5712010 – 5712015 – 5718235 / 3166914865 – 3002156925 – 3187122429, CUCUTA, N. S.
tecnosuelosltda@gmail.com

Apéndice C. Agua del acueducto metropolitano de Bucaramanga 2017

No Aplica		CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCION																			
F CC 507-006																					
Rev.:1		LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																			
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA		AÑO:		2017															
PARAMETROS		Parámetros Fisicoquímicos														Parámetros Microbiológicos					
MES	No. Muestras Fisicoquímicas	Cloro residual mg Cl ₂ /L	Turbiedad UNT	Color Aparente Unidades Pt-Co	pH	Conductividad µS/cm	Olor 0: Aceptable 1: No Aceptable	Sabor 0: Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg Al/L	Alcalinidad mg CaCO ₃ /L	Dureza mg CaCO ₃ /L	Cloruros mg Cl/L	Sulfatos mg SO ₄ /L	Hierro mg Fe/L	Nitratos mg NO ₃ /L	Nitritos mg NO ₂ /L	No.de Muestras Microbiológicas	Recuento heterótrofo en placa UFC/100ml	Coliformes Totales UFC/100ml	E. coli UFC/100ml	Σ IRCA MENSUAL %
Enero	180	0,89	0,82	5,2	7,40	164	0	0	0,05	54,6	78,5	3,1	23,4	< 0,12	0,7	< 0,01	180	59	0	0	0,15
Febrero	168	0,99	0,62	4,2	7,46	184	0	0	0,05	58,8	76,2	3,8	25,4	< 0,12	0,8	< 0,01	168	39	0	0	0,00
Marzo	186	0,95	0,82	5,2	7,14	162	0	0	0,06	44,8	70,8	3,9	29,8	< 0,12	0,9	< 0,01	186	25	0	0	0,14
Abril	174	0,89	1,1	6,5	7,09	142	0	0	0,08	38,6	65,5	2,7	28,1	< 0,12	1,0	< 0,01	174	17	0	0	0,62
Mayo	186	0,98	1,1	6,7	7,03	132	0	0	0,07	36,2	60,3	2,5	25,1	< 0,12	1,0	< 0,01	186	28	0	0	0,69
Junio	180	0,92	1,0	6,6	7,04	125	0	0	0,09	39,7	53,2	2,6	20,5	< 0,12	0,8	< 0,01	180	11	0	0	0,58
Julio	186	0,91	0,98	7,0	7,22	125	0	0	0,08	45,9	59,1	2,8	17,7	< 0,12	0,9	< 0,01	186	37	0	0	0,28
Agosto	186	0,92	0,99	6,4	7,35	126	0	0	0,08	43,6	56,0	2,9	18,9	< 0,12	1,0	< 0,01	186	19	0	0	0,56
Septiembre	180	0,93	1,2	6,4	7,19	138	0	0	0,09	45,1	58,7	2,7	18,5	< 0,12	0,9	< 0,01	180	16	0	0	0,72
Octubre	186	0,96	0,97	6,3	7,24	134	0	0	0,07	44,2	58,0	3,0	20,7	< 0,12	1,0	< 0,01	186	8	0	0	0,56
Noviembre	180	0,99	0,96	5,7	7,06	126	0	0	0,05	35,3	52,5	2,9	22,1	< 0,12	1,1	< 0,01	180	12	0	0	0,85
Diciembre	180	0,96	0,86	5,1	7,23	131	0	0	0,05	43,4	59,5	2,9	23,0	< 0,12	0,9	< 0,01	180	10	0	0	0,15
PROMEDIO	181	0,94	0,95	5,9	7,20	141	0	0	0,07	44,2	62,4	3,0	22,8	< 0,12	0,9	< 0,01	181	23	0	0	0,44
RES. 2115/07	3/día	0,3-2,0	≤2	≤15	6,5-9,0	≤1000	ACEP	ACEP	0,2	200	300	250	250	0,3	10,0	0,1	6/día	100	0	0	0 - 5
Convenciones:		mg/L: miligramos por litro. UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad. Unidades Pt-Co: Unidades de Platino Cobalto. IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua. < Léase como menor al límite de cuantificación.																			
Nota:		El IRCA promedio, determinado en este periodo con los parámetros ensayados y establecidos en la Resolución 2115 de 2007, clasifica el agua "sin riesgo" y "apta para el consumo humano"																			
ISO/IEC 17025:2005 11-LAB-031		Revisó y Aprobó:														CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ					



Revisó y Aprobó:


CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ
 Jefe Laboratorio Control Calidad Aguas
 Químico Matricula Profesional PQ-1520

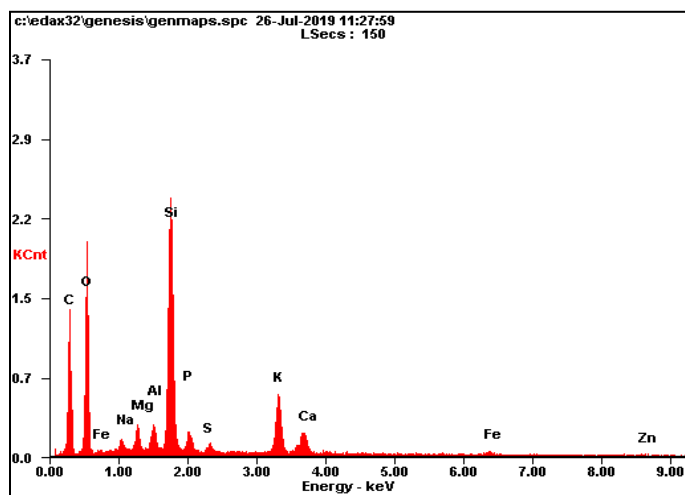
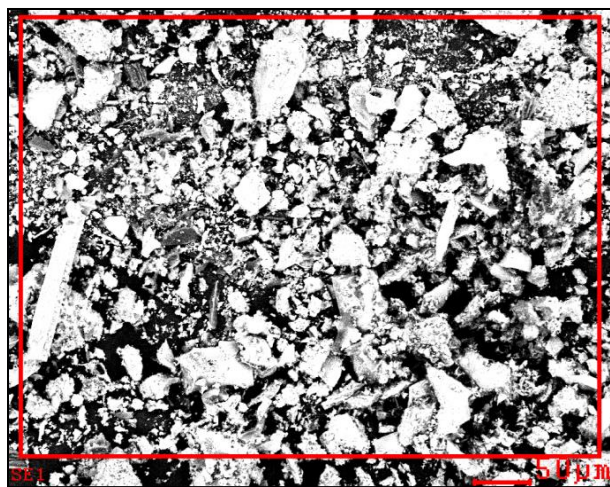
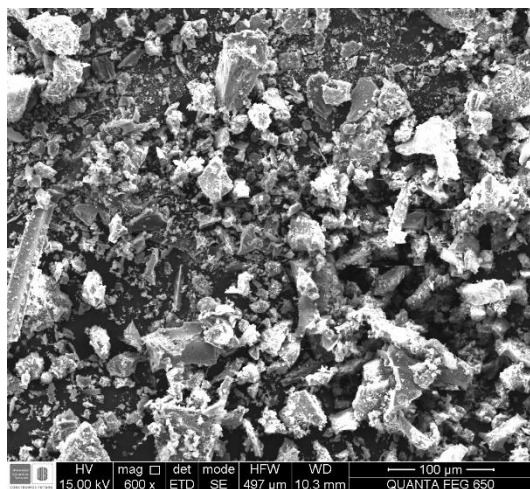
"Fin del Informe"

CONTROLA SGC
 2007-06-1

Apéndice D. Microscopía Electrónica de Barrido.

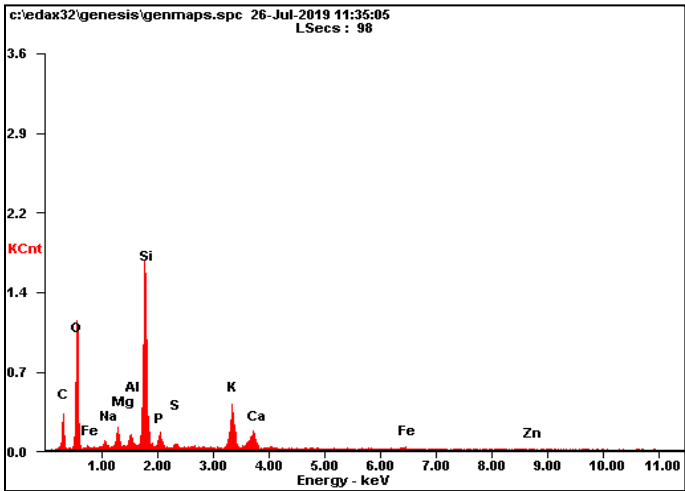
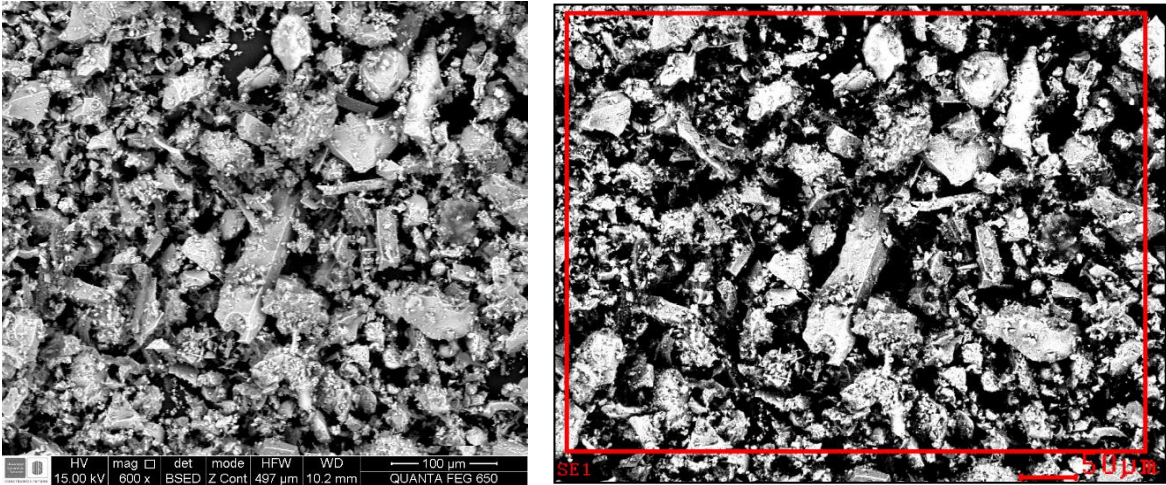
Ceniza de bagazo de campo (CBC)

CBC1



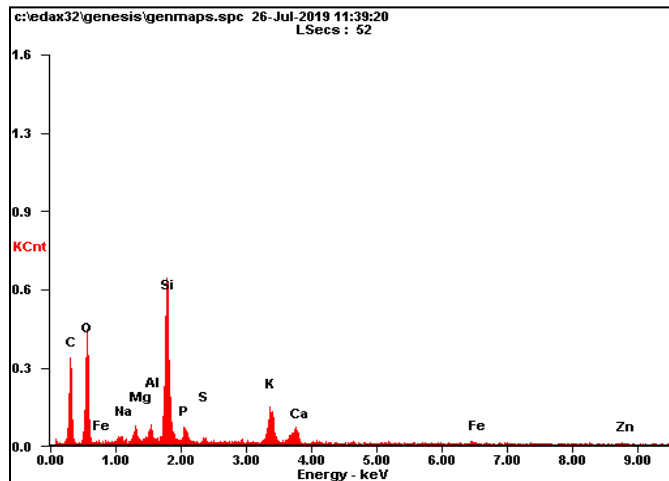
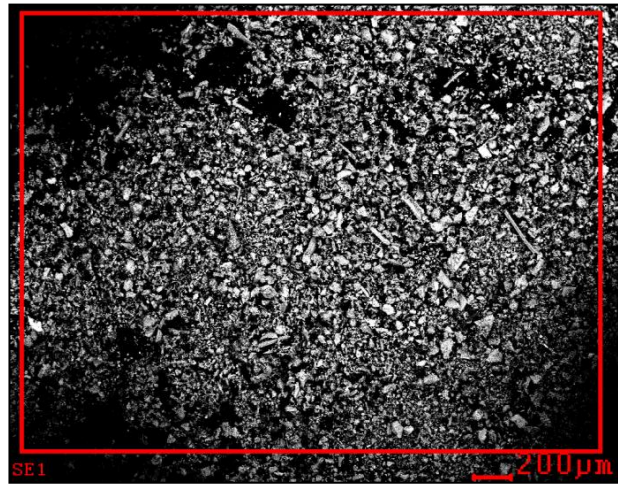
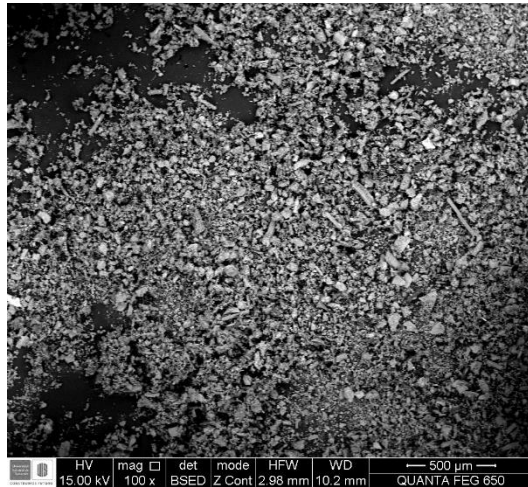
Element	Wt%	At%
CK	28.28	43.45
OK	27.87	32.14
NaK	01.12	00.90
MgK	01.59	01.21
AlK	01.83	01.25
SiK	17.76	11.67
PK	01.77	01.05
SK	00.75	00.43
KK	08.92	04.21
CaK	04.05	01.86
FeK	02.56	00.85
ZnK	03.51	00.99
Matrix	Correction	ZAF

CBC2



Element	Wt%	At%
CK	15.62	26.84
OK	30.56	39.44
NaK	00.92	00.83
MgK	02.14	01.82
AlK	01.72	01.32
SiK	23.09	16.98
PK	02.25	01.50
SK	00.72	00.47
KK	10.90	05.76
CaK	05.42	02.79
FeK	02.96	01.09
ZnK	03.69	01.16
Matrix	Correction	ZAF

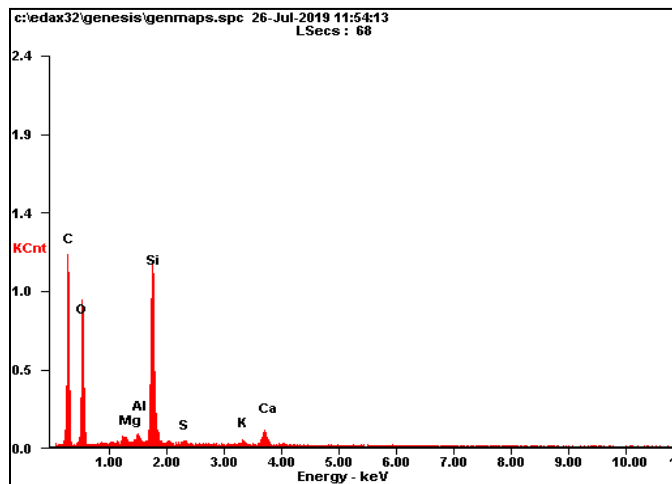
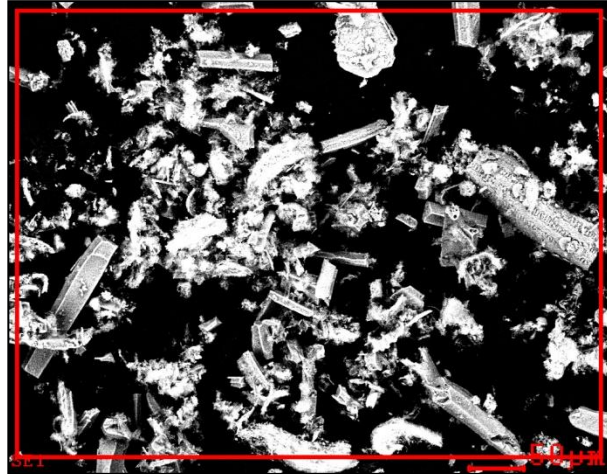
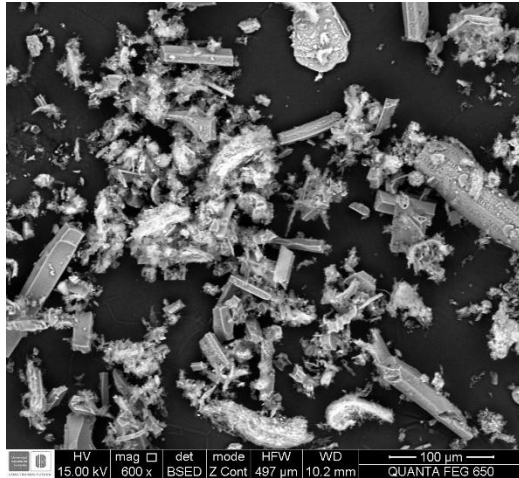
CBC3



Element	Wt%	At%
CK	30.35	46.11
OK	26.46	30.17
NaK	00.82	00.65
MgK	01.63	01.22
AlK	01.82	01.23
SiK	18.00	11.69
PK	01.49	00.88
SK	00.42	00.24
KK	08.57	04.00
CaK	04.26	01.94
FeK	02.92	00.95
ZnK	03.26	00.91
Matrix	Correction	ZAF

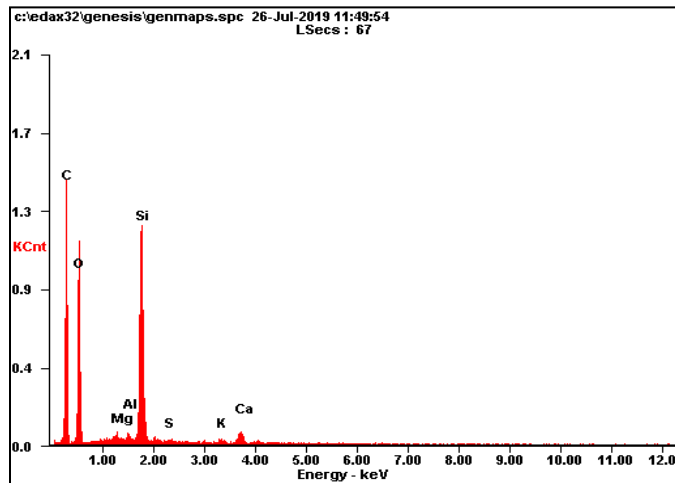
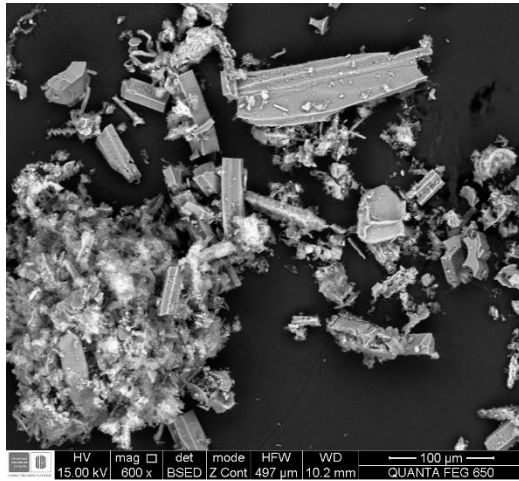
Ceniza de bagazo de laboratorio (CBL)

CBL1



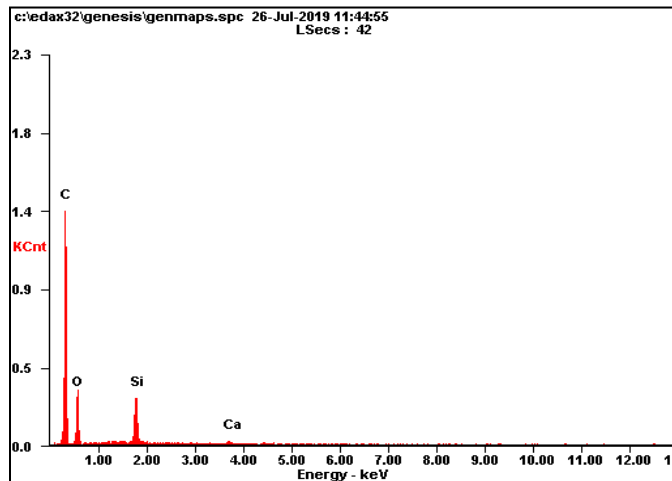
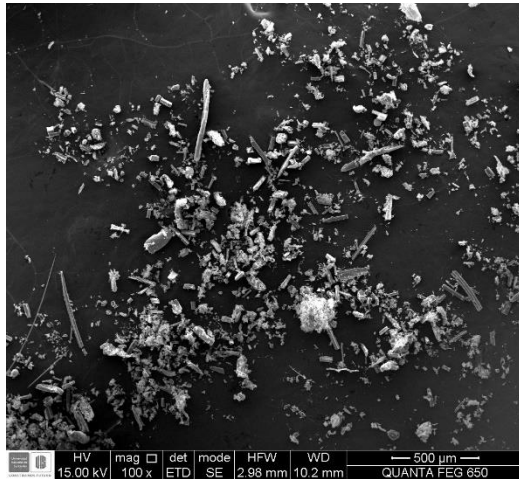
Element	Wt%	At%
CK	45.75	58.42
OK	30.47	29.21
MgK	00.77	00.49
AlK	00.77	00.43
SiK	17.66	09.64
SK	00.39	00.18
KK	00.68	00.27
CaK	03.51	01.34
Matrix	Correction	ZAF

CBL2



Element	Wt%	At%
CK	46.76	59.20
OK	30.51	29.00
MgK	00.44	00.27
AlK	00.46	00.26
SiK	18.11	09.81
SK	00.39	00.19
KK	00.61	00.24
CaK	02.73	01.03
Matrix	Correction	ZAF

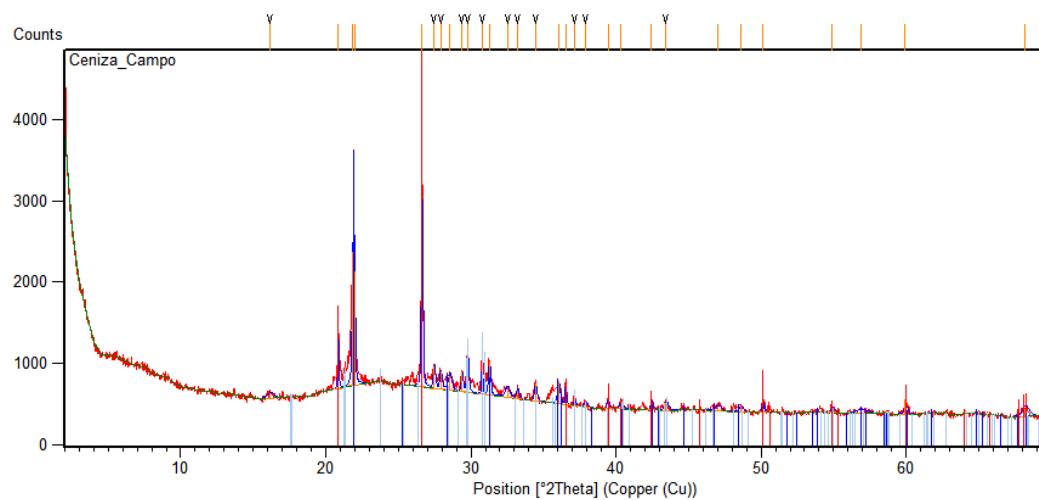
CBL3



Element	Wt%	At%
CK	64.35	73.43
OK	25.44	21.79
SiK	08.77	04.28
CaK	01.44	00.49
Matrix	Correction	ZAF

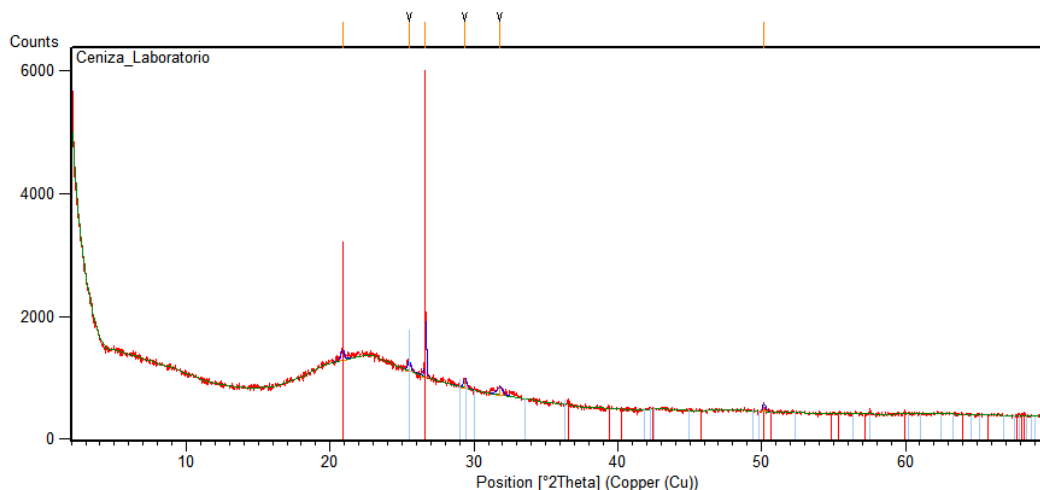
Apéndice E. Difracción de Rayos X

Ceniza de bagazo de campo (CBC)



Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
01-079-1910	Quartz	Si O ₂	62	1,002
01-077-1317	Cristobalite, syn	Si O ₂	43	0,597

Ceniza de bagazo de laboratorio (CBL)



Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
01-083-2465	Quartz	Si O ₂	61	0,785

Apéndice F. Análisis granulométrico.

Muestra (g)	168,65	Ceniza de Laboratorio	
Tamiz	Diámetro (mm)	Masa Retenida (g)	% Pasa
No. 4	4,76	0,00	100,00
No. 8	2,38	0,00	100,00
No. 16	1,19	0,15	99,91
No. 30	0,60	0,39	99,68
No. 50	0,297	4,20	97,19
No. 100	0,149	124,78	23,20
No. 200	0,074	30,55	5,09
No. 325	0,044	6,55	1,20
Fondo		1,99	3,91
Masa Final		168,61	

Muestra (g)	308,58	Ceniza de Campo	
Tamiz	Diámetro (mm)	Masa Retenida (g)	% Pasa
No. 4	4,76	56,81	81,59
No. 8	2,38	45,00	67,01
No. 16	1,19	52,76	49,91
No. 30	0,60	38,64	37,39
No. 50	0,297	38,36	24,96
No. 100	0,149	36,89	13,00
No. 200	0,074	18,45	7,02
Fondo		20,48	0,39
Masa Final		307,39	

Muestra (g)	290,64	Ceniza de Campo (1 hora en molino)	
Tamiz	Diámetro (mm)	Masa Retenida (g)	% Pasa
No. 4	4,76	0,00	100,00
No. 8	2,38	0,00	100,00
No. 16	1,19	2,00	99,31
No. 30	0,60	0,75	99,05
No. 50	0,297	13,43	94,43
No. 100	0,149	94,60	61,88
No. 200	0,074	146,24	11,57
No. 325	0,044	30,00	1,25
Fondo		3,27	0,12
Masa Final		290,29	

Muestra (g)	402,23	Arena fina de rio	
Tamiz	Diámetro (mm)	Masa Retenida (g)	% Pasa
No. 4	4,76	0,00	100,00
No. 8	2,38	2,20	99,45
No. 16	1,19	16,91	95,25
No. 30	0,60	38,60	85,65
No. 50	0,297	141,34	50,51
No. 100	0,149	153,29	12,40
No. 200	0,074	39,45	2,60
Fondo		9,90	0,13
Masa Final		401,69	