

Juan Fernando Gómez Pérez

**UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA URBANA**

Aprovechamiento de cenizas de carbón mineral
producidas en la industria local como material
conglomerante en la construcción

TESIS DE MAESTRÍA

JUAN FERNANDO GÓMEZ-PÉREZ

DIRECTORA: Gladis Estela Morales Mira



Grupo de Investigaciones y Mediciones Ambientales GEMA

Universidad de Medellín

Medellín, 2011

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar mis agradecimientos a todas aquellas personas que me brindaron su colaboración y apoyo para la realización de este trabajo de investigación. Al centro de laboratorios de la Universidad de Medellín, a los laboratoristas Libardo y Robert; al ingeniero Yhan Paul Arias Jaramillo por su amistad y colaboración.

ABREVIATURAS

DRX: Difracción de Rayos X

FRX: Fluorescencia de Rayos X

ASTM: Sociedad americana para los ensayos de materiales

NOTACIONES EN LA QUÍMICA DEL CEMENTO

S: SiO₂

N: Na₂O

A: Al₂O₃

H: H₂O

C: CaO

F: Fe₂O₃

K: K₂O

C-S-H: Silicato de calcio hidratado

N-A-S-H: Aluminosilicato de sodio hidratado

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	11
1 MARCO TEÓRICO	13
1.1 MATERIALES CEMENTANTES.....	14
1.1.1 FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.....	15
1.1.2 CEMENTOS ALCALINOS.....	18
1.2 ACTIVACIÓN QUÍMICA.....	19
1.2.1 MATERIAS PRIMAS	20
1.2.2 CONDICIONES DE CURADO	22
1.2.3 ACTIVADOR ALCALINO: NATURALEZA Y CONCENTRACIÓN	23
1.3 APROXIMACIÓN AL CICLO DE VIDA	23
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	25
2.1 ESFERA SOCIAL.....	26
2.2 ESFERA ECOLÓGICA.....	27
2.3 ESFERA ECONÓMICA.....	31
3. ANTECEDENTES.....	33
3.1 GEOPOLÍMEROS COMO MATERIAL SOSTENIBLE.....	33
3.1.1 EMISIONES ATMOSFÉRICAS.....	34
3.1.2 GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	36
3.2 MATERIAL.....	37
3.3 ACTIVACIÓN ALCALINA.....	38
3.3.1 EVOLUCIÓN DE LA REACCIÓN.....	39
4 OBJETIVOS.....	42
OBJETIVO GENERAL.....	42
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	42
5 HIPOTESIS	42
6 ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	43
6.1 METODOLOGÍA.....	43
6.1.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	44
6.1.2 PREPARACIÓN DE ACTIVADORES	46
6.1.3 DETERMINACIÓN DE FLUJO.....	48

6.1.4	CURADO DE LAS MUESTRAS.....	49
6.1.5	ENSAYO A COMPRESIÓN.....	51
6.1.6	DETERMINACIÓN DE MATERIAL INQUEMADO	51
6.1.7	DETERMINACIÓN DE FASES VÍTREAS POR MEDIOS QUÍMICOS ...	52
6.1.8	COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	53
6.1.9	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA	53
6.2	APROXIMACIÓN AL CICLO DE VIDA	54
6.3	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	55
7	RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	58
7.1	CARACTERIZACIÓN DE CENIZAS	58
7.1.1	FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	60
7.1.2	DIFRACCIÓN DE RAYOS X	62
7.1.3	DETERMINACIÓN DE FASES VÍTREAS POR MEDIOS QUÍMICOS ...	68
7.1.4	DETERMINACIÓN DE MATERIAL INQUEMADO	68
7.2	ENSAYOS PRELIMINARES.....	69
7.2.1	CONTROL DE FLUJO.....	69
7.2.2	EFFECTO DEL TIPO DE CURADO.....	72
7.3	ENSAYOS MECÁNICOS - MUESTRAS DEFINITIVAS	74
7.3.1	COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN.....	74
7.4	MODELO ESTADÍSTICO	76
7.4.1	SIMPLIFICACIÓN DEL MODELO	83
7.5	ACTIVACIÓN ALCALINA.....	87
7.6	APROXIMACIÓN DEL CICLO DE VIDA.....	89
7.6.1	OBJETO Y ALCANCE DE ESTUDIO.....	89
7.6.2	ANÁLISIS DE INVENTARIO	90
7.6.3	IMPACTOS AMBIENTALES ASOCIADOS	95
8	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	97
9	CONCLUSIONES.....	100
10	BIBLIOGRAFÍA.....	102
11	ANEXOS.....	107
11.1	EMISIONES PRODUCCIÓN HIDRÓXIDO DE SODIO	107

11.2	RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESIÓN (MPa)	108
11.3	Referencia NASH	111
11.4	Referencia SiO ₂	112
11.5	Referencia Tenardita	113
11.6	Referencia Cuarzo	114
11.7	Referencia Nefelina	115

Índice de Figuras

Figura 1. Evolución de los materiales cementantes Fuente: Boletín informativo AIDICO No. 26. 2009.....	15
Figura 2. Precios internacionales del cemento (US\$ por saco) [16]	18
Figura 3. Representación ciclo de vida para el Biodisel de palma aceitera [30]. ...	24
Figura 4. Desarrollo sostenible.....	26
Figura 5. Relleno para la disposición de cenizas [39].....	29
Figura 6. Variación en los contenidos promedios de Cenizas y poder calorífico de los carbones de Amagá [41].....	31
Figura 7. Concentración del CO ₂ atmosférico (ppm) y producción mundial de cemento Portland (millones de toneladas) durante los periodos 1840-2000. Fuentes: IPCC – Cembureau [15].....	34
Figura 8. Aproximación a la reducción de emisiones por la utilización de geopolímeros [53]	35
Figura 9. Influencia del curado en horno sobre la resistencia a la compresión [61]	39
Figura 10. Inicio de la activación alcalina [62].....	40
Figura 11. Condensación de productos de reacción [62].....	41
Figura 12. Micrografía 60 días de curado [62].....	41
Figura 13. Funcionamiento de un ciclón (imagen modificada de internet) [64].....	43
Figura 14. Batidora Hobart	45
Figura 15. Orden de apisonamiento para el moldeo de los especímenes [3]	46
Figura 16. Mesa de flujo.....	49
Figura 17. Horno de curado	50
Figura 18. Prensa electrónica HM 3000.....	51
Figura 19. Equipo de análisis difractométrico de rayos X.....	54
Figura 20. Ceniza extraída del multiciclón empresa textil	58
Figura 21. Cenizas volantes central termoelectrica	59
Figura 22. Distribución granulométrica de ceniza cruda.....	59
Figura 23. Patrones identificados mediante DRX.....	63
Figura 24. Picos identificados de mayor coincidencia – Ceniza tamizada.....	64
Figura 25. Lista de picos y patrones. Ceniza tamizada.....	65

11.2	RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESIÓN (MPa)	108
11.3	Referencia NASH	111
11.4	Referencia SiO ₂	112
11.5	Referencia Tenardita	113
11.6	Referencia Cuarzo	114
11.7	Referencia Nefelina	115

Índice de Figuras

Figura 1. Evolución de los materiales cementantes Fuente: Boletín informativo AIDICO No. 26. 2009.....	15
Figura 2. Precios internacionales del cemento (US\$ por saco) [16]	18
Figura 3. Representación ciclo de vida para el Biodisel de palma aceitera [30]. ...	24
Figura 4. Desarrollo sostenible.....	26
Figura 5. Relleno para la disposición de cenizas [39].....	29
Figura 6. Variación en los contenidos promedios de Cenizas y poder calorífico de los carbones de Amagá [41].....	31
Figura 7. Concentración del CO ₂ atmosférico (ppm) y producción mundial de cemento Portland (millones de toneladas) durante los periodos 1840-2000. Fuentes: IPCC – Cembureau [15].....	34
Figura 8. Aproximación a la reducción de emisiones por la utilización de geopolímeros [53]	35
Figura 9. Influencia del curado en horno sobre la resistencia a la compresión [61]	39
Figura 10. Inicio de la activación alcalina [62].....	40
Figura 11. Condensación de productos de reacción [62].....	41
Figura 12. Micrografía 60 días de curado [62].....	41
Figura 13. Funcionamiento de un ciclón (imagen modificada de internet) [64].....	43
Figura 14. Batidora Hobart	45
Figura 15. Orden de apisonamiento para el moldeo de los especímenes [3]	46
Figura 16. Mesa de flujo.....	49
Figura 17. Horno de curado	50
Figura 18. Prensa electrónica HM 3000.....	51
Figura 19. Equipo de análisis difractométrico de rayos X.....	54
Figura 20. Ceniza extraída del multiciclón empresa textil	58
Figura 21. Cenizas volantes central termoelectrica	59
Figura 22. Distribución granulométrica de ceniza cruda.....	59
Figura 23. Patrones identificados mediante DRX.....	63
Figura 24. Picos identificados de mayor coincidencia – Ceniza tamizada.....	64
Figura 25. Lista de picos y patrones. Ceniza tamizada.....	65

Figura 26. Difractograma y reporte de picos Ceniza sin tamizar.....	65
Figura 27. Lista de picos y patrones. Ceniza U de M (2).....	66
Figura 28. Comparación difractogramas de cenizas locales	67
Figura 29. Evaluación del material inquemado	69
Figura 30. Material posterior al proceso de calcinación.....	69
Figura 31. Flujo de la solución N4S0. Relación Arena/Ceniza= 0,5.....	70
Figura 32. Flujo solución N4S0. Relación Arena/Ceniza= 1,5.....	70
Figura 33. Flujo de la solución N3S75. Relación Arena/Ceniza= 1,0	71
Figura 34. Flujo de la solución N2S0. Relación Arena/Ceniza= 0,5.....	71
Figura 35. Efecto del curado en la resistencia mecánica (KN)	73
Figura 36. Medias y 95% LSD FISHER	75
Figura 37. Gráfica de residuos para resistencia a compresión (28 días).....	77
Figura 38. Diagrama de Pareto estandarizado	78
Figura 39. Gráfica de efectos principales para resistencia a compresión (28 días)	80
Figura 40. Gráfica de interacciones para resistencia de compresión.....	81
Figura 41. Gráfica de interacción BC para resistencia a compresión (28 días)	82
Figura 42. Contornos de la superficie de respuesta estimada (puntos al centro) .	82
Figura 43. Contornos de la superficie estimada (máximo relativo).....	83
Figura 44. Gráfica de residuos para resistencia a compresión (28 días- simplificada)	84
Figura 45. Diagrama de Pareto Estandarizado (Simplificado).....	85
Figura 46. Superficie de respuesta estimada (modelo simplificado).....	86
Figura 47. Contornos de superficie para la respuesta estimada (modelo simplificado)	86
Figura 48. Difractograma de Ceniza Activada (sin tamizar) 28 días de curado	87
Figura 49. Efecto de la activación alcalina en la mineralogía. 28 días.	88
Figura 50. Flujos de materia y energía en el sistema de producto.....	90
Figura 51. Mezcladora de concreto tipo cacerola (Yongkang Goldstone Industry & Trade Co).....	93
Figura 52. Horno de curado propuesto	94
Figura 53. Efecto de la adición de Na ₂ SO ₄ en compuestos geopoliméricos [25]	98

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de peligrosidad en Cenizas Volantes [10].....	14
Tabla 2. Composición de las fases químicas en el cemento.....	17
Tabla 3. Composición química típica de las cenizas volantes (% en peso).....	21
Tabla 4. Consumo de carbón y producción de cenizas de 25 empresas en Antioquia y sus zonas de influencia.....	29
Tabla 5. Comparativos de material inquemado.....	37
Tabla 6. Aplicaciones de los geopolímeros según su composición	38

Figura 26. Difractograma y reporte de picos Ceniza sin tamizar.....	65
Figura 27. Lista de picos y patrones. Ceniza U de M (2).....	66
Figura 28. Comparación difractogramas de cenizas locales	67
Figura 29. Evaluación del material inquemado	69
Figura 30. Material posterior al proceso de calcinación.....	69
Figura 31. Flujo de la solución N4S0. Relación Arena/Ceniza= 0,5.....	70
Figura 32. Flujo solución N4S0. Relación Arena/Ceniza= 1,5.....	70
Figura 33. Flujo de la solución N3S75. Relación Arena/Ceniza= 1,0	71
Figura 34. Flujo de la solución N2S0. Relación Arena/Ceniza= 0,5.....	71
Figura 35. Efecto del curado en la resistencia mecánica (KN)	73
Figura 36. Medias y 95% LSD FISHER	75
Figura 37. Gráfica de residuos para resistencia a compresión (28 días).....	77
Figura 38. Diagrama de Pareto estandarizado	78
Figura 39. Gráfica de efectos principales para resistencia a compresión (28 días)	80
Figura 40. Gráfica de interacciones para resistencia de compresión.....	81
Figura 41. Gráfica de interacción BC para resistencia a compresión (28 días)	82
Figura 42. Contornos de la superficie de respuesta estimada (puntos al centro) .	82
Figura 43. Contornos de la superficie estimada (máximo relativo).....	83
Figura 44. Gráfica de residuos para resistencia a compresión (28 días- simplificada)	84
Figura 45. Diagrama de Pareto Estandarizado (Simplificado).....	85
Figura 46. Superficie de respuesta estimada (modelo simplificado).....	86
Figura 47. Contornos de superficie para la respuesta estimada (modelo simplificado)	86
Figura 48. Difractograma de Ceniza Activada (sin tamizar) 28 días de curado	87
Figura 49. Efecto de la activación alcalina en la mineralogía. 28 días.	88
Figura 50. Flujos de materia y energía en el sistema de producto.....	90
Figura 51. Mezcladora de concreto tipo cacerola (Yongkang Goldstone Industry & Trade Co).....	93
Figura 52. Horno de curado propuesto	94
Figura 53. Efecto de la adición de Na ₂ SO ₄ en compuestos geopoliméricos [25]	98

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de peligrosidad en Cenizas Volantes [10].....	14
Tabla 2. Composición de las fases químicas en el cemento.....	17
Tabla 3. Composición química típica de las cenizas volantes (% en peso).....	21
Tabla 4. Consumo de carbón y producción de cenizas de 25 empresas en Antioquia y sus zonas de influencia.....	29
Tabla 5. Comparativos de material inquemado.....	37
Tabla 6. Aplicaciones de los geopolímeros según su composición	38

Tabla 7. Características granulométricas de la arena Ottawa	44
Tabla 8. Características Silicato de Sodio comercial	46
Tabla 9. Formulación Soluciones activadoras	48
Tabla 10. Configuración prensa electrónica.....	51
Tabla 11. Variables y niveles modelo experimental.....	55
Tabla 12. Descripción del modelo experimental	56
Tabla 13. Características granulométricas ceniza tamizada (tamiz húmedo)	60
Tabla 14. Composición química muestra de cenizas tamizadas – ensayos preliminares -	60
Tabla 15. Composición química de cenizas sin tamizado.....	61
Tabla 16. Compuestos identificados DRX – Ceniza tamizada	63
Tabla 17. Compuestos identificados DRX – Ceniza sin tamizar	66
Tabla 18. Muestras evaluación tipo de curado.....	72
Tabla 19. Efecto del curado de las muestras.....	72
Tabla 20. Resumen estadístico ANOVA ensayos tipo de curado.....	73
Tabla 21. Tabla ANOVA para el tipo de curado, $\alpha = 0,05$	73
Tabla 22. Tabla de Medias para Resistencia a compresión (28 días) por muestra con intervalos de confianza del 95,0%. Unidades: MPa.....	75
Tabla 23. Múltiples Rangos para Resistencia a compresión (28 días) por muestra. 95% Fisher.....	76
Tabla 24. Análisis de varianza.....	77
Tabla 25. Estadísticos ANOVA.....	78
Tabla 26. Efectos estimados para la resistencia a compresión (28 días).....	79
Tabla 27. Coeficientes de regresión para resistencia a compresión.....	80
Tabla 28. Óptimo experimental	83
Tabla 29. Efectos excluidos en simplificación del modelo	83
Tabla 30. ANOVA Simplificada	84
Tabla 31. Estadísticos ANOVA Simplificada	84
Tabla 32. Coeficientes de regresión (modelo simplificado)	85
Tabla 33. Compuestos identificados DRX – Ceniza Activada (sin tamizar) 28 días de curado	87
Tabla 34. Factores de emisión red eléctrica nacional.....	91
Tabla 35. Emisión de CO ₂ equivalente en la producción de 1 Kg de Hidróxido de sodio [74].....	92
Tabla 36. Potenciales de calentamiento global de interés	92
Tabla 37. Especificaciones técnicas mezcladora de concreto	93
Tabla 38. Proceso de mezclado.....	93
Tabla 39. Especificaciones técnicas horno de curado	94
Tabla 40. Proceso de curado	94
Tabla 41. Características del Activador.....	95
Tabla 42. Emisiones asociadas al proceso	95
Tabla 43. Emisiones asociadas.....	95

Título del trabajo: Aprovechamiento de cenizas de carbón mineral producidas en la industria local como material conglomerante en la construcción

Autor: Juan Fernando Gómez Pérez

Título otorgado: MSc. Ingeniería urbana

Asesor del trabajo: Gladis Estela Morales Mira

Programa de donde egresa: Maestría en ingeniería urbana

Ciudad: Medellín

Año: 2012

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto de investigación consiste en aprovechar un residuo industrial mediante la formación de un geopolímero. El material conglomerante fue obtenido a través de la activación alcalina de cenizas sin la adición de cemento.

Se evaluaron diferentes mezclas de mortero con la variación de los siguientes factores: temperatura de curado, relación arena/ceniza, tipo de curado, concentración de hidróxido de sodio y porcentaje de silicato de sodio en el activador. En el modelo estadístico utilizado se seleccionó como variable respuesta la compresión mecánica a una edad de curado de 28 días.

Las cenizas fueron caracterizadas mineralógicamente mediante difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX) y su reactividad por medios químicos. En la caracterización se evidenciaron desventajas intrínsecas al residuo como lo son: elevado contenido de material inquemado y tamaños de partículas mayores a las recomendables.

Como producto de la caracterización mineralógica del material activado se detectó la formación de aluminosilicato de sodio hidratado, el cual ha sido reportado en diferentes investigaciones como producto de geopolimerización.

Al material obtenido se le evaluó el desempeño ambiental mediante una aproximación al ciclo de vida. Dicho análisis se realizó con base en la emisión de gases efecto invernadero asociados a la activación alcalina de 2,5 toneladas de cenizas. Se concluye que asociada a la activación de 1 Kg de mortero geopolimérico bajo las condiciones del presente estudio emite 0,39 Kg de CO₂ equivalente. Este resultado es únicamente representativo para las condiciones tecnológicas y los límites utilizados en este estudio.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad como producto de las actividades humanas se generan residuos sólidos, muchos de ellos provienen del sector industrial y algunos son vertidos al ambiente generando problemáticas de contaminación ambiental, en los últimos años la necesidad de encontrar nuevas formas de reciclaje de materiales se ha transformado en un desafío para la ciencia y la tecnología de los materiales [1] que se traduce en una serie de investigaciones [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] alrededor del mundo que se discutirán a continuación (entre otros).

Un ejemplo de dichos residuos son las cenizas de combustión de carbón mineral, residuo que se produce en los centros urbanos y que son susceptibles de aprovechamiento.

En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá se estima una producción de cenizas de carbón mineral producto de las actividades industriales de cerca de 27.000 toneladas anuales [9], las cuales son parcialmente utilizadas como adición al cemento Portland, pero en una gran mayoría son dispuestas como residuo en rellenos sanitarios o escombreras generando problemas de contaminación ambiental.

El alcance de la presente investigación es la utilización de éste residuo en áreas como la construcción con producción de geopolímeros mediante la activación de cenizas de carbón mineral con la visión de obtener un material con una resistencia de 5 MPa que pueda ser utilizado en elementos no estructurales y que adicionalmente se considera de uso común en construcción, pero que constituya una alternativa de manejo a los residuos producidos en varias empresas locales.

Para el desarrollo de la investigación se emplearon las cenizas de carbón mineral producidas por una empresa local en sus calderas de producción de vapor. Las materias primas utilizadas para la producción de los geopolímeros son cenizas producto de la combustión de carbón bituminoso. Se seleccionó una muestra de 700 Kg que corresponde a la cantidad promedio mensual emitida por una empresa mediana local dedicada al tejido y tinción textil. Se desarrolló un diseño de experimental factorial fraccionado $2_{v^{5-1}}$ con cuatro puntos al centro, el cual incluyó las variables: concentración de NaOH, porcentaje de adición de silicato de sodio, tipo de curado, temperatura de curado y relación másica arena/ceniza. Como variable respuesta se establece la resistencia a la compresión de cubos de mortero y el objetivo del modelo era maximizar la resistencia a tiempos de curado de 28 días.

Las muestras fueron evaluadas a compresión según la norma ASTM C109/C 109M [10] para ello se utilizaron especímenes cúbicos de longitud 50 mm. Debido a las variaciones en la densidad y viscosidad de los activadores, se incluyó como variable de control la fluidez de los morteros evaluada según la norma ASTM C1437 [11]. Para la preparación de los morteros se utilizó arena Ottawa con el fin de estandarizar la granulometría y reducir los efectos de la reactividad presentes en las arenas silíceas.

Como resultado de la caracterización de las cenizas se encontró que estas presentan una relación Si/Al igual a 1,1. Valor que se considera adecuado para la obtención de geopolímeros útiles en la construcción [12].

Se concluye que las cenizas de combustión de carbón producidas a nivel industrial en el Valle de Aburrá son susceptibles de aprovechamiento mediante las técnicas de activación alcalina dado que poseen contenidos adecuados de SiO₂ reactiva y alumina, sin embargo se deben controlar los contenidos de material no quemado presentes en los materiales para alcanzar mejores desempeños mecánicos. Es necesario realizar más análisis a las cenizas en el tiempo y espacio con el fin de analizar la variabilidad en la composición química y su potencial de utilización.

Por otra parte, este tipo de desarrollos se articulan con políticas y programas nacionales e internacionales relacionados con la reducción de gases efecto invernadero, el mejoramiento de la calidad de vida de la población urbana y rural más pobre y la erradicación de la pobreza como es el caso de la meta 11 del séptimo objetivo del milenio sobre la erradicación de los tugurios garantizando la sostenibilidad del medio ambiente.

4 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Obtener un material compuesto geopolimérico para el aprovechamiento de un excedente industrial

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar las características físicas y químicas de los residuos propuestos.
2. Desarrollar mezclas a partir de ceniza y activadores alcalinos.
3. Evaluar la resistencia mecánica de los materiales y elementos constructivos.
4. Evaluar la sostenibilidad ambiental de los materiales compuestos obtenidos a partir de residuos sólidos industriales.

5 HIPOTESIS

Es posible producir materiales compuestos a partir de cenizas que sean económicos y ambientalmente sostenibles.

1 MARCO TEÓRICO

Los geopolímeros son materiales elaborados a partir de fuentes de aluminosilicatos y se han investigado desde hace más de 30 años. Joseph Davidovits [13], los define como polímeros “polisialatos” que siguen la fórmula empírica $M_n [(Si - O_2)_z - Al - O_2]_n, w-H_2O$ donde z es 1, 2 o 3, M es sodio, potasio o una mezcla; n es el grado de policondensación y w tiene un valor cercano a siete [13].

Estos materiales se pueden elaborar a partir de diferentes materias primas pero los comúnmente trabajados son metacaolines (obtenidos por la calcinación de caolines) y las cenizas de carbón mineral. A pesar de que ambos materiales tienen composiciones ricas en aluminosilicatos las formas de activación de los materiales procede de una forma diferente, por lo que las características de las materias primas son la herramienta principal para llevar a cabo la activación.

Las cenizas hacen parte de los materiales denominados puzolanas, las cuales pueden ser de dos tipos según su origen, de origen natural como son las cenizas volcánicas o rocas sedimentarias, y artificiales como aquellas resultantes de procesos industriales que involucren altas temperaturas, por ejemplo la calcinación de arcillas [14].

Por otra parte, según la norma UNE 83-415-87 la ceniza volante se define como el producto sólido y en estado de fina división procedente de la quema de carbón pulverizado en los hogares de centrales térmicas, que es arrastrado por los gases del proceso y recuperado de ellos en los filtros [15]. Según esta definición el término ceniza volante no es aplicable a productos separados o condensados de flujos de gases procedentes de otros procesos industriales, como es el caso de las cenizas de carbón mineral que se generan en diversos procesos industriales de la ciudad de Medellín y que son el objeto de estudio de la presente investigación, sin embargo en su composición química hay presencia de aluminosilicatos, por lo tanto se pretende evaluar su potencial para la producción de geopolímeros.

Las cenizas volantes son removidas de las corrientes gaseosas por dispositivos mecánicos (ciclones, filtros de talegas, etc) o electrostáticos. Generalmente la proporción entre las cenizas volantes y las cenizas de fondo varía según la tecnología de quemado, sin embargo se establece, por ejemplo, que dicha relación es 70:30 para quemadores húmedos y 85:15 para quemadores secos [16].

Ambientalmente las cenizas tienen implicaciones que las pueden catalogar como un residuo peligroso, ya que presenta riesgos para la salud por inhalación debido a su tamaño, y composición química. Así mismo pueden presentar riesgos para el ambiente por el contenido de metales pesados y corrosividad. Es por estas razones que su manipulación y disposición requiere cuidados especiales.

Según el convenio de Basilea las cenizas volantes tienen el potencial de ser un residuo peligroso catalogándolas como: *A2060 Cenizas volantes de centrales eléctricas de carbón que contengan sustancias del anexo I en concentraciones tales que presenten características del anexo III (véase la entrada correspondiente en la lista B B2050)*[17]. Las características que se le pueden asignar a estos residuos y que le otorgan el potencial carácter de peligroso se encuentran descritas en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de peligrosidad en Cenizas Volantes [17]

Clase de las naciones unidas ¹	Código	Características
9	H11	Sustancias tóxicas (con efectos retardados o crónicos) Sustancias o desechos que, de ser aspirados o ingeridos, o de penetrar en la piel, pueden entrañar efectos retardados o crónicos, incluso la carcinogénesis.
9	H13	Sustancias que pueden, por algún medio, después de su eliminación, dar origen a otra sustancia, por ejemplo, un producto de lixiviación, que posee alguna de las características arriba expuestas.

Así mismo las concentraciones máximas permisibles obtenidas en pruebas de lixiviación (TCLP) se encuentran reguladas a nivel nacional por el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia mediante el decreto 4741 de 2005.

1.1 MATERIALES CEMENTANTES

En la búsqueda de la sociedad por aumentar su bienestar se han desarrollado diferentes materiales cementantes que han evolucionado hasta el día de hoy (ver Figura 1). En la actualidad se ha popularizado el uso del cemento Portland inventado por Joseph Aspidin en 1824, el cual se encuentra entre los materiales de construcción de mayor demanda energética después del aluminio y el acero [18].

¹ Corresponde al sistema de numeración de clases de peligros de las recomendaciones de las Naciones Unidas sobre el transporte de mercaderías peligrosas (ST/SG/AC.10/1/Rev.5, Naciones Unidas, Nueva York, 1988).

La fabricación de cemento Portland es un proceso de alta demanda energética, con un indicador de ≈ 4.000 KJ/Kg de cemento con un 25% de pérdidas y con alta emisión de contaminantes ($0,76 - 1,0$ Kg CO_2/Kg cemento) por descarbonatación de materia prima y el uso de combustibles [19, 20, 21, 22].



Figura 1. Evolución de los materiales cementantes Fuente: Boletín informativo AIDICO No. 26. 2009

Es una industria que por lo general, en términos económicos, está caracterizada por el arquetipo de un oligopolio homogéneo, al tratarse de un mercado en el que participa un número reducido de firmas que producen un bien “poco diferenciado” [23]. Este número reducido de productores es explicado por la existencia de barreras a la entrada de nuevos competidores que pueden ser de tipo natural, como la geografía y la cercanía del centro de procesamiento a yacimientos de piedra caliza, o pueden resultar de los altos costos de inversión que debe asumir una empresa a la hora de entrar a operar en la industria [23].

1.1.1 FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

En la presente investigación es de relevancia conocer el proceso de fabricación del cemento Portland, debido a que el material pretende la sustitución del cemento Portland en algunas aplicaciones. Por otra parte, es importante

conocer el proceso para visualizar los aspectos ambientales asociados a la producción del cemento. Esta información será útil para analizar los indicadores de ciclo de vida que se discutirán mas adelante.

Existen dos métodos para la producción de cemento [24]:

- El sistema de producción por vía húmeda: cuando la molienda se realiza en presencia de agua dado que se facilita el transporte y se disminuye la emisión de material particulado, pero se incrementa el consumo de combustibles fósiles durante la cocción para extraer el agua en exceso.
- El sistema de producción por vía seca: cuando el producto de la molienda es una harina el cual se homogeniza por aire (fluidificación)

La pasta o harina cruda homogenizada se lleva a un horno rotatorio inclinado, el cual está conformado por un cilindro de acero, con diámetro entre 3 y 5m y una longitud que puede ser superior a 150m. En el horno la pasta adquiere cada vez mayor temperatura sufriendo las siguientes transformaciones [24]:

- a. Secado del crudo ($< 200^{\circ}\text{C}$) Evaporación del agua libre [24].
- b. Calentamiento ($200^{\circ}\text{C} - 700^{\circ}\text{C}$) se quemam impurezas orgánicas, se elimina agua combinada de la arcilla y se elimina el CO_2 de la magnesita, MgCO_3 [24].
- c. Calcinación ($700^{\circ}\text{C} - 1100^{\circ}\text{C}$) Se completa el proceso de disociación de los carbonatos de calcio y de magnesio y se forma óxido de calcio libre (CaO). Además, se descomponen los minerales dando lugar a la formación de los minerales C_3A , CA y en parte C_2S . Hasta esta fase todas las reacciones son endotérmicas [24].
- d. Reacciones exotérmicas ($1100^{\circ}\text{C} - 1300^{\circ}\text{C}$) Se forman C_3A , C_4AF y C_2S . El aumento de la temperatura en el horno es rápido en un tramo relativamente corto [24].
- e. Sinterización o clinkerización ($1300^{\circ}\text{C} - 1450^{\circ}\text{C} - 1300^{\circ}\text{C}$) La temperatura alcanza el valor de 1450°C , el cual es necesario para la fusión parcial del crudo y la formación completa del principal componente mineralógico, el C_3S , el cual se forma por reacción entre el C_2S y el CaO sobrante [24].
- f. Enfriamiento ($1300^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$) se forma por completo la estructura y composición definitiva del clinker, en la cual figuran C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF y

los componentes secundarios. El clinker sale del horno en forma de granos petreos, de forma esférica, de tamaños pequeños y de color gris. En esta fase del proceso es donde se da la característica de alta reactividad del clinker [24].

El clinker es llevado a un proceso de molienda y se realiza la adición del 3% al 5% de yeso, con el fin de controlar el tiempo de fraguado del cemento resultante. Además se pueden adicionar rellenos o materiales activos. Finalmente el cemento es despachado en sacos o a granel [24].

Tabla 2. Composición de las fases químicas en el cemento²

COMPONENTE	TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV	TIPO V
Silicato tricálcico C ₃ S	50	42	60	26	40
Silicato dicálcico C ₂ S	24	33	13	50	40
Aluminato tricálcico C ₃ A	11	5	9	5	4
Aluminoferrita tetracálcica C ₄ AF	8	13	8	12	9
TOTAL	93	93	93	93	93

Según la jefatura de investigaciones del Instituto Colombiano de Productores de Cemento –ICPC– (2008), el mercado colombiano para el consumo de cemento Portland se estima en nueve millones de toneladas de cemento Portland por año [25].

La Figura 2 presenta los precios del cemento en la región a mediados del año 2006. Se aprecia que el precio en Colombia (US\$ 5.8 por saco) estaba por encima del promedio de la región (US\$ 5,08 por saco). Igualmente, Chile, Puerto Rico y Costa Rica presentaban los precios más elevados y República Dominicana, el menor [26].

² Memorias: Introducción a la durabilidad del Hormigón.

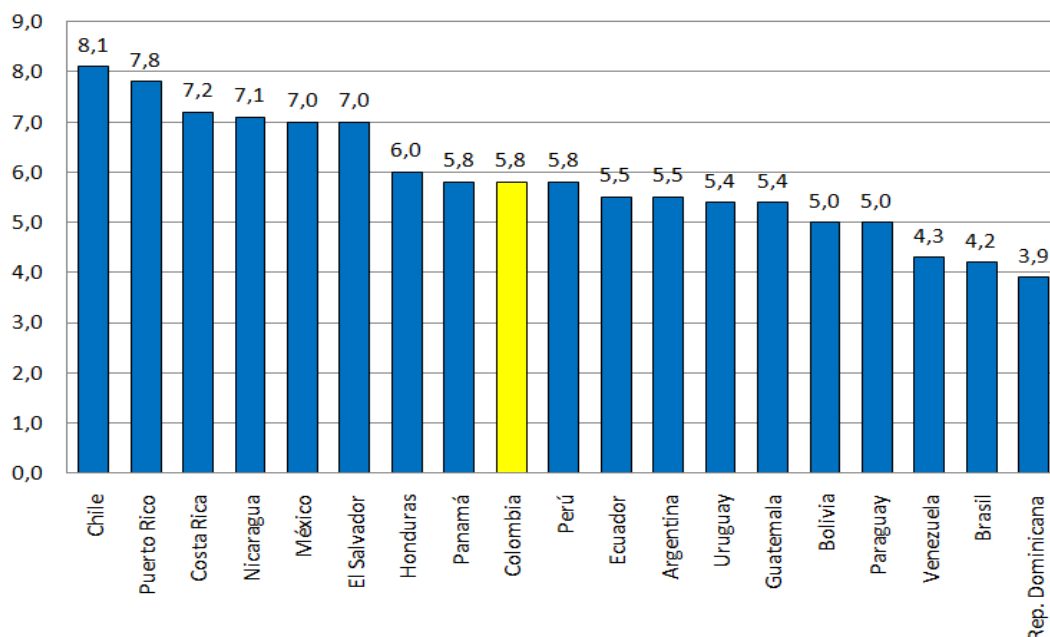


Figura 2. Precios internacionales del cemento (US\$ por saco) [23]

1.1.2 CEMENTOS ALCALINOS

Los cementos alcalinos son aquellos materiales que se obtienen a partir de la activación alcalina de compuestos ricos en sílice, alúmina y calcio. Pueden diferenciarse dos grandes grupos, los materiales ricos en calcio, sílice y alúmina, conocidos como Cerámicos Enlazados Químicamente o CBC por sus siglas en inglés y los geopolímeros que son materiales ricos en sílice y alúmina con menor contenido de calcio.

En ambos casos (CBC y geopolímeros) los productos se obtienen mediante la activación alcalina, no obstante su iniciación ocurre de manera diferente. Para los CBC el mineral base es activado por medio de una solución alcalina débil y el principal producto de reacción es un gel de silicato cálcico hidratado (C-S-H) [27], como el del cemento Portland ordinario, el cual requiere un ambiente de formación con presencia de especies solubles de calcio y silicatos en un pH cercano a la neutralidad [28]; es por ello que la composición química del material a activar contiene principalmente Silicio (Si) y Calcio (Ca). Por otra parte, en los geopolímeros la composición de las materias primas se basan en Silicio (Si) y Aluminio (Al) y su activación requiere una solución altamente alcalina [29] que inhibe la formación del C-S-H y propicia la formación de geles de aluminosilicatos hidratados tridimensionales (ejemplo: N-A-S-H³).

³ Aluminio Silicato de Sodio Hidratado – N-A-S-H

La composición química de las cenizas obedece a que el carbón contiene diferentes cantidades de impurezas no combustibles, las cuales, están presentes en forma de caliza, dolomita, feldespato y cuarzo. A medida que el combustible viaja a través de las zonas de alta temperatura, la materia orgánica y el carbón son quemados, mientras que las impurezas se mantienen sin quemar. Este material se conserva en dos diferentes formas, cenizas volantes, las cuales viajan con el gas, y cenizas de fondo, las cuales se aglomeran en el horno y forman materiales de mayor tamaño.

La utilización de cenizas en los cementos y hormigones es una práctica que se ha generalizado en diferentes lugares del mundo y como resultado de ello se han publicado normas de la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés). Por ejemplo, en el caso estadounidense, el uso de las cenizas volantes como aditivos de hormigones tiene más de 30 años, sin embargo la presente investigación se centra en el aprovechamiento de cenizas con cero contenido de cemento, como es el caso de los geopolímeros que son objeto de la presente investigación.

1.2 ACTIVACIÓN QUÍMICA

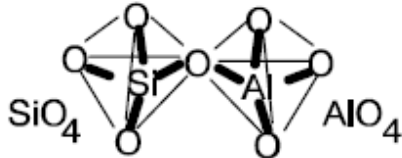
La activación alcalina es un término utilizado para describir el proceso de reacción, el cual se lleva a cabo mediante una policondensación a bajas temperaturas con el fin de producir geopolímeros. Dicho término fue acuñado por Joseph Davidovits en el año 1978 después de desarrollar investigaciones en materiales para la construcción que no fueran tóxicos ni inflamables [30].

La activación química de las cenizas depende de múltiples factores, los cuales pueden influir sobre la calidad del material que se puede llegar a obtener. Dentro de dichos factores se encuentran algunos externos como la naturaleza del activador alcalino, la temperatura y el tiempo de curado, etc., y otros factores internos como la composición de la ceniza y su relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$.

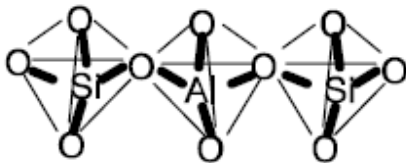
Los geopolímeros pueden exhibir diferentes estructuras caracterizadas por tetraedros de aluminatos y silicatos denominados “aluminosilicatos”. Sus precursores son AlO_4 y el SiO_4 , los cuales pueden encontrarse en algunos minerales como el metacaolín de composición nominal ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) [30, 31]. Dichos precursores también pueden ser encontrados en otros materiales como las cenizas de combustión de carbón mineral, las cuales son vertidas como desecho industrial y presentan fases reactivas que permiten su utilización.

Las estructuras formadas tienen cargas estabilizadas por los cationes de los activadores alcalinos (sodio y potasio son los más comunes) y se desarrollan tres tipos de silicio-oxo-aluminatos denominados “sialatos”:

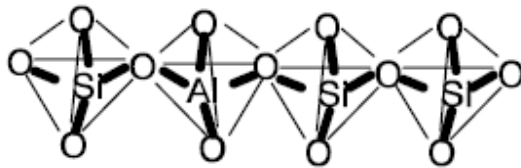
1. Sialato (-Si-O-Al-O-)



2. Sialato siloxo (-Si-O-Al-O-Si-O-)



3. Sialato disiloxo (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)



Estos fragmentos son condensados y precipitados formando las estructuras poliméricas denominadas Polisialatos (PS), Polisialatos-siloxo (PSS) y Polisialatos-disiloxo (PSDS). Dichas redes son unidas compartiendo los oxígenos de las estructuras de los sialatos [30, 32] dando origen al material polimérico.

Los parámetros que influyen en la síntesis de geopolímeros son principalmente: [7]

- Materias primas
- Condiciones de curado
- Naturaleza y concentración del activador alcalino

1.2.1 MATERIAS PRIMAS

Los materiales más utilizados para la activación alcalina son el metacaolín y las cenizas volantes, de las cuales estas últimas están fundamentalmente constituidas por:

- Óxidos de silicio

- Óxidos de aluminio
- Óxidos de hierro

Por definición, las cenizas volantes (en inglés, *fly ash*) son partículas finas pulverizadas que “vuelan” desde la cámara de combustión y que son capturadas por equipos de control atmosférico como precipitadores electrostáticos o filtros de talegas. En su composición química este material es virtualmente idéntico a cenizas volcánicas con propiedades puzolánicas [33]. El principal inconveniente para obtener un producto de propiedad mecánica estándar radica en la heterogeneidad de los tamaños de partícula.

Como producto de combustión de carbón también se han utilizado las cenizas de fondo (en inglés, *bottom ash*) las cuales se definen como un aglomerado de partículas que se forman en los hornos de combustión de carbón. Dichos aglomerados son demasiado grandes para ser transportados por las corrientes de gases en las calderas y se adhieren a las paredes de la caldera o caen a la tolva de cenizas ubicada en el fondo de la caldera [33].

Según la composición química de las cenizas se ha desarrollado una clasificación de dichos materiales, para esto se han definido algunos criterios básicos en función de ciertos parámetros, los cuales a su vez, permiten evaluar la utilidad potencial del material para la obtención de materiales cementantes. En la Tabla 3 se presentan dichos estándares.

Tabla 3. Composición química típica de las cenizas volantes (% en peso)

Parámetro	Clase F	Clase F	Clase C	Clase C
	Bajo Fe	Alto Fe	Alto Ca	Bajo Ca
SiO ₂	46 - 57	42 - 54	25 - 42	46 - 59
Al ₂ O ₃	18 - 29	16,5 - 24	15 - 21	14 - 22
Fe ₃ O ₃	6 - 16	16 - 24	5 - 10	5 - 13
CaO	1,8 - 5,5	1,3 - 3,8	17 - 32	8 - 16
MgO	0,7 - 2,1	0,3 - 1,2	4 - 12,5	3,2 - 4,9
K ₂ O	1,9 - 2,8	2,1 - 2,7	0,3 - 1,6	0,6 - 1,1
Na ₂ O	0,2 - 1,1	0,2 - 0,9	0,8 - 6,0	1,3 - 4,2
SO ₃	0,4 - 2,9	0,5 - 1,8	0,4 - 5,0	0,4 - 2,5
LOI	0,6 - 4,8	1,2 - 5,0	0,1 - 1,0	0,1 - 2,3
TiO ₂	1 - 2	1 - 1,5	< 1	< 1

Fuente: (CII-ITC Center of Excellence for Sustainable Development s.f.)

Esta clasificación C o F aparece en la norma ASTM C618⁴ [34], surge cuando las cenizas se utilizan como aditivos para la mezcla en concretos y se traduce en las siguientes propiedades:

⁴ Equivalente a la norma NTC 3493

Clase C: son cenizas derivadas de la combustión de carbón sub-bituminoso y consisten principalmente de sulfatos de calcio y aluminio, así como cuarzo, aluminatos de calcio y óxidos de calcio libre (CaO). La composición de las cenizas clase C generalmente contiene más de un 20 % de CaO. Los concretos obtenidos a partir de estas cenizas generalmente endurecen más rápido, en comparación con las cenizas clase F, debido a que contienen su propia cal.

Clase F: son cenizas derivadas de la combustión de carbón bituminoso y antracitas y consisten fundamente de aluminosilicatos, cuarzo, mullita y magnetita. Las cenizas clase F generalmente contienen menos de 10% de CaO en su composición.

Esta clasificación es relevante en el tema de las adiciones al cemento Portland, ya que las variaciones en la composición de la materia prima conllevan a la activación por medio de relaciones molares S/A y N/S en diferentes rangos. A pesar de que tanto los cementos activados de escorias como geopolímeros basados en cenizas volantes y/o metacaolín, son considerados sistemas cementantes de activación alcalina, se ha identificado que tanto la estructura formada como las rutas de los mecanismos químicos de adquisición de resistencias mecánicas son diferentes a los tradicionales del cemento Portland [35].

En cuanto a las materias primas existen algunos parámetros los cuales permiten evaluar la viabilidad de utilización de cenizas con objetivos de obtención de materiales cementantes [36]. Dichos parámetros son:

- $\text{CaO} < 8\%$ y $\text{Fe}_2\text{O} < 14\%$
- Contenido de SiO_2 reactiva $> 40\%$
- Contenido en fase vítrea $> 50\%$
- Superficie determinada por BET $> 900 \text{ m}^2/\text{Kg}$
- % de partículas con un tamaño inferior a las $45 \mu\text{m} > 75\%$

1.2.2 CONDICIONES DE CURADO

Según Davidovits (1982), la policondensación, que es el proceso en el cual se forman las zeolitas que proporcionan la resistencia mecánica, tiene lugar a unas temperaturas inferiores a 120°C con un rango recomendable entre 60 y 95°C . Del mismo modo enuncia que dicho proceso requiere unos tiempos de curado que varían en función de la temperatura y la forma de calentamiento [13].

El proceso de curado del material se puede resumir con la evaluación de tres aspectos principales. Los efectos de la interacción activador/ceniza y el grado de reacción de la activación, el tiempo y el aumento de la temperatura [7].

1.2.3 ACTIVADOR ALCALINO: NATURALEZA Y CONCENTRACIÓN

El papel que juegan las soluciones alcalinas se puede resumir en tres funciones: la primera, acelera la solubilización del desecho industrial; la segunda, favorece la formación de hidratos estables de baja solubilidad; y la tercera, favorece la formación de una estructura más compacta [25].

El activador alcalino también desempeña un rol importante en el producto final, tanto desde el catión como desde el anión.

Los metales alcalinos son: Na, K, Fr, Rb, Cs, Li, pero los que se han evaluado más ampliamente son el Na, K y Li, encontrando que el sodio (Na) ofrece las mejores características debido a su tamaño y carácter alcalino. Aunque el potasio es más alcalino que el sodio, su tamaño ha demostrado ser perjudicial en los resultados mecánicos finales y el litio, debido a su menor tamaño se hidrata muy rápidamente y se vuelve muy voluminoso [7].

Los aniones que se han estudiado son: OH⁻, Silicatos y Carbonatos. Sobre cada uno de ellos se reportan las siguientes propiedades [7]:

- Hidroxilos: actúan como catalizadores
- Silicatos: Aumentan la relación Si/Al otorgando mejores resistencias mecánicas.
- Carbonatos acidifican las muestras por lo que disminuyen las velocidades de reacción.

Del mismo modo, los activadores son compuestos alcalinos tales como: hidróxidos, sales de ácidos débiles y ácidos fuertes, y sales salicílicas del tipo $R_2O_{(n)} \cdot SiO_2$, donde R es un ión alcalino como Na, K, o Li. Entre las soluciones activantes más utilizadas se encuentran: el NaOH, Na₂CO₃, el silicato de sodio (Na₂SiO₃), Ca(OH)₂, Na₂SO₄, CaSO₄, etc., o mezclas de los mismos; aunque se considera al NaOH, Na₂CO₃ y Na₂SiO₃ como las soluciones activantes que aportan mejores propiedades en las mezclas de cementos activados alcalinamente [25].

1.3 APROXIMACIÓN AL CICLO DE VIDA

La ECV estudia los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo de la vida de un producto desde la adquisición de la materia prima pasando por la producción, el uso y la disposición. Entre las categorías generales de

impactos ambientales que es necesario considerar están el uso de los recursos, la salud humana y las consecuencias ecológicas.

Debido a que el ACV considera todas las etapas del ciclo de vida de un producto o servicio, se pueden llegar a conocer todos los impactos ambientales asociados e identificar su origen y magnitud. De esta manera, se pueden determinar en qué áreas o procesos están las oportunidades para reducir los impactos ambientales y también reconocer mejoras aparentes que no contribuyen a mejorar el problema sino a direccionarlo a otro lugar. Por lo tanto, el ACV contribuye brindando información de calidad para la toma de decisiones sobre los patrones de producción y consumo, políticas y estrategias de gestión [37].

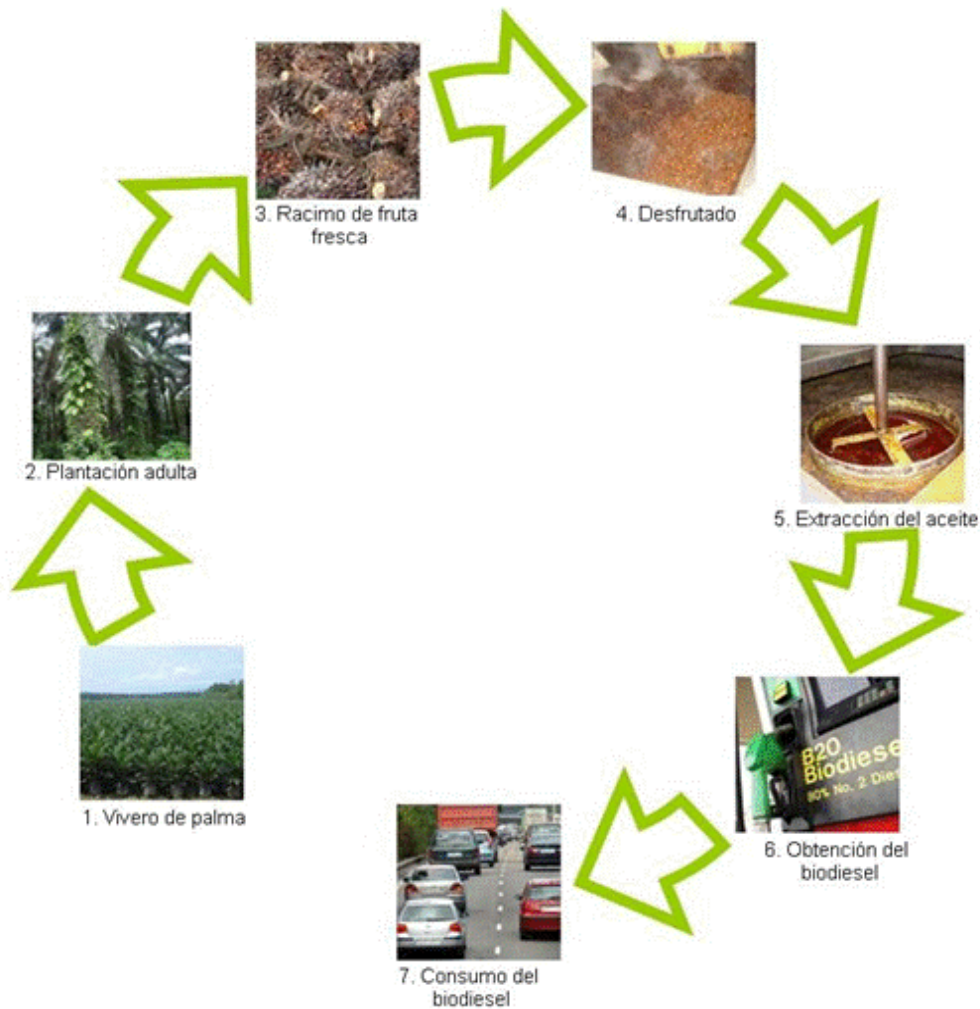


Figura 3. Representación ciclo de vida para el Biodiesel de palma aceitera [37].

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según el reporte “nuestro futuro común”, más conocido como el informe Brundtland, el desarrollo sostenible se define como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades.

A partir de este concepto se han generado otras tendencias, entre ellas, se resalta el de sostenibilidad que se divide en sostenibilidad fuerte (con fundamentos ecológicos) y el de sostenibilidad débil (con fundamentos en la economía clásica). Sin entrar en la discusión sobre sus diferencias se pretende que los resultados del proyecto se encaminen hacia la sostenibilidad de los sistemas urbanos y para ello se toman los siguientes principios [38]:

- Bienestar humano, equidad y solidaridad: contenido en las definiciones de desarrollo sostenible. En este sentido, la explotación, la desigualdad y la pobreza son problemas ecológicos.
- Relacional: contenido en las definiciones del sostenibilidad hace referencia a que todos los procesos y fenómenos tienen vínculos de diverso orden entre sí.
- Prevención: es un concepto relacionado con el anterior en el cual se justifican medidas como el reciclaje, reuso y reutilización. Tiene como premisa que los recursos son escasos.
- Información – conocimiento: el cual propende por el conocimiento y la experiencia como recursos fundamentales, según lo cual el cambio de procesos basados en los materiales por aquellos basados en el uso de recursos humanos es siempre una opción mas innovadora y sostenible.
- Sinergia: Este concepto se apoya en conceptos de multifuncionalidad, versatilidad y flexibilidad, es decir: *“Una solución será mas sostenible cuantos mas problemas resuelva simultáneamente”*
- Subsidiariedad: es un principio según el cual, los problemas se deben solucionar en la escala más próxima al origen.
- Participación: bajo este principio, *cuanto más implicados estén en la toma de decisiones los diversos agentes y usuarios afectados por un determinado proceso, más conocimiento se acumulará sobre el propio proceso y más se*

contribuirán a evitar los posibles conflictos derivados, identificarlos y canalizarlos hacia vías constructivas.

La búsqueda de materiales alternativos sostenibles se basa en los lineamientos del desarrollo sostenible, los cuales pueden resumirse en la Figura 4. Bajo estos lineamientos se deben desarrollar productos que propendan por la justicia social, la calidad ambiental y la prosperidad económica. Lo cual tiene relación con la calidad de vida de las personas.

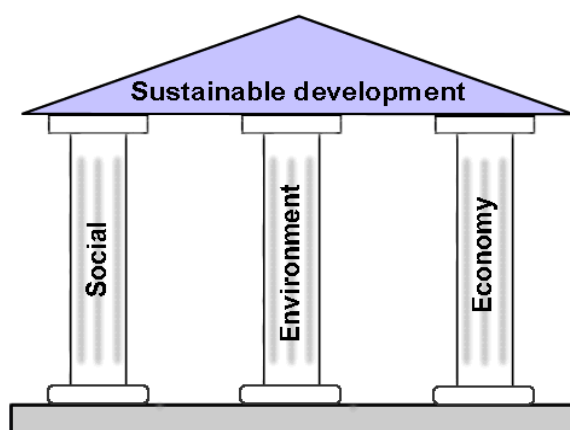


Imagen tomada de internet: <http://www.sustainability-ed.org.uk/pages/what3-1.htm>

Figura 4. Desarrollo sostenible

Para el caso del Valle de Aburrá (Medellín, Antioquia) se cuenta con acceso a reservas brutas de 157'276.000 toneladas de carbón bituminoso en la cuenca del Sinifaná (Amagá, Antioquia), las cuales tienen un contenido de cenizas promedio del 9,8% en base seca [39]. En estudios realizados en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, determinaron que el contenido de cenizas en diferentes muestras de carbón puede variar entre un 2% y un 11% dependiendo, no solo de la mina de la cual se extrae el mineral, sino que también del método de extracción [9]. Con base en la información suministrada se puede esperar una emisión de cenizas entre 3'145.520 y 17'300.360 toneladas de cenizas durante el periodo de explotación de dichas reservas de carbón.

2.1 ESFERA SOCIAL

En la actualidad una investigación de este tipo se justifica en programas internacionales con pertinencia local. Como ejemplo de ello se reconocen esfuerzos internacionales enmarcados por el programa de las Naciones Unidas para los asentamientos humanos y los objetivos del milenio. Los cuales

propenden explícitamente por el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes urbanos y rurales.

En las ciudades latinoamericanas es común encontrar asentamientos precarios que evidencian las desigualdades sociales y que configuran un pasivo económico, social y ambiental que afecta la sostenibilidad de las ciudades, ya que su presencia genera disminución de la calidad de vida, deficiencias de cobertura de servicios públicos, aumento de vulnerabilidad a eventos naturales, daño a los ecosistemas naturales urbanos, extra costos al presupuesto público, evasión fiscal, etc.

A nivel colombiano se tiene que “la población urbana de Colombia se incrementó del 39% en 1951, al 75% en 2005. Cada año se establecen en las áreas urbanas alrededor de 185 mil nuevos hogares, generando una fuerte presión sobre la demanda actual y futura de vivienda [40].

Para Colombia se reporta que en el año 2004 al menos 1.3 millones de hogares, que representan el 16% de los hogares urbanos se encuentran en condiciones de precariedad habitacional, es decir, habitan viviendas sin servicios básicos, que están construidas con materiales inadecuados, presentan hacinamiento o se encuentran en zonas de alto riesgo. Así mismo, de acuerdo con información catastral, se calcula que el 16% del área neta de uso residencial corresponde a asentamientos precarios en las cinco principales ciudades del país y la proporción aumenta en las demás ciudades con menor población. La demanda para el año 2004 de vivienda fue de 185.000 unidades correspondiente a igual número de hogares que se forman anualmente, sin embargo la oferta de nuevas viviendas es de tan solo el 50% de la demanda [40] y en la mayoría de los casos son inaccesibles a los nuevos habitantes urbanos.

2.2 ESFERA ECOLÓGICA

En la actualidad se presentan problemáticas ambientales por la indebida disposición final de residuos sólidos, calentamiento global, ubicación de rellenos sanitarios, etc. Además de esto, en nuestro entorno latinoamericano existen deficiencias de vivienda y espacio público, por lo que es necesario investigar sobre compuestos constructivos que sean sostenibles.

El aprovechamiento de residuos sólidos en sí mismo es una práctica de sostenibilidad ambiental, ya que su desarrollo implica maximizar la capacidad de servicio de residuos que, de no ser así, generarían impactos ambientales tales como contaminación de las aguas, disminución de la vida útil de sitios

de disposición final y/o el aumento de las áreas de extracción de recursos para suplir las necesidades humanas.

Dentro de los beneficios ambientales generados por la implementación de los resultados de una investigación de este tipo se encuentran:

1. Disminución de gases efecto invernadero -GEI- por la utilización de materiales con altas demandas energéticas.
2. Mitigación de impactos ambientales generados por la disposición final de cenizas y residuos sólidos.
3. Mitigación de impactos ambientales originados en los barrios de tugurios, debido a la inadecuada apropiación del territorio y materiales de construcción inadecuados.
4. Mejoramiento de las viviendas y las zonas periféricas de la ciudad con planeamientos urbanos pensados en el ser humano y la naturaleza.

Por otra parte, es reconocido a nivel mundial los impactos negativos generados por la producción de cemento Portland Ordinario, por ejemplo, diferentes autores estiman que la producción de cemento a nivel mundial representa cerca de 1,35 billones de toneladas de CO₂ anuales [41] lo que significa el 7% de la emisión global [27, 42], pero que con las tasas de crecimiento poblacional y desarrollo industrial se estima que en pocos años llegará al 17% [42].

Las emisiones en la producción de cemento Portland Ordinario están relacionadas principalmente con el proceso de clinkerización (0,55 Kg CO₂/Kg cemento), pero también se deben incluir las relacionadas con el consumo de combustibles (0,40 Kg CO₂/Kg cemento), así como otras emisiones asociadas a la extracción y el transporte de las materias primas, las cuales no son comúnmente contabilizadas y de las cuales no se tiene información.

Las cenizas de carbón son un residuo generado en grandes cantidades y por diferentes sectores. A nivel mundial se producen millones de toneladas de este residuo debido a la demanda energética industrial y doméstica. Entre el 20 y el 30% de este material es utilizado como adición puzolánica en el Cemento Portland y el hormigón, por otra parte se investiga su potencial para la recuperación de metales, elaboración de adsorbentes y la agricultura [43, 44] en este último aspecto algunos autores citan que podría desencadenar algunos desastres ambientales [44]. El material que no es aprovechado es

dispuesto en rellenos sanitarios (ver Figura 5), alternativa que es considerada la solución de manejo actualmente más utilizada [4, 43, 45], pero que se encuentra en revisión por sus aspectos ambientales [44].



Figura 5. Relleno para la disposición de cenizas [45]

A pesar de la escala del problema, los residuos y sus mecanismos de contaminación han sido pobremente estudiados, por lo que una mejor comprensión de los procesos envueltos en la lixiviación y movilidad puede facilitar un mejor control ambiental [46].

Como se puede observar en la Tabla 4, para las ciudades del eje cafetero (Medellín, Manizales y Pereira) se puede estimar una producción de cenizas superior a 26.852 toneladas anuales con base en el consumo de carbón de las minas de Amagá, suponiendo en la mayoría de los casos un contenido de cenizas de tan solo el 2%, excepto en Coltejer S.A. que fue del 8%, dato que se ajusta mejor a la realidad según estudios realizados sobre las características del carbón de dichos yacimientos [39] y a los resultados de la evaluación de 11 proveedores de la empresa de mayor consumo de carbón en el Valle de Aburrá [47].

Tabla 4. Consumo de carbón y producción de cenizas de 25 empresas en Antioquia y sus zonas de influencia

EMPRESAS		Consumo Carbón	Cenizas
		(ton/año)	(ton/año)
1	Alimentos Copelia	36,00	0,72
2	Coloidales S.A.	420,00	8,40
3	Creaciones M. Blanco	900,00	18,00
4	Hinestrosa y Cía	960,00	19,20
5	Laboratorio Higietex	240,00	4,80
6	Lavandería los Trajes	600,00	12,00
7	Minerales Industriales	960,00	19,20

EMPRESAS		Consumo Carbón	Cenizas
		(ton/año)	(ton/año)
8	Súper de Alimentos	360,00	7,20
9	Tintorería y L. Espumar	480,00	9,60
10	Tintorería Mil Colores	558,00	11,16
11	Tintorería T.P.Q	432,00	8,64
12	Bavaria (Manizales)	4.320,00	86,40
13	Bavaria (Pereira)	4.800,00	96,00
14	Colombiana Kimberly	4.320,00	86,40
15	Fatelares S.A.	1.332,00	26,64
16	Lavamoda Ltda.	1.704,00	34,08
17	Pasabocas Margarita	1.440,00	28,80
18	Teñidos y acabados	1.680,00	33,60
19	Tintorería Servicolor	3.600,00	72,00
20	Cervecería Unión S.A.	14.160,00	283,20
21	Coltejer S.A.	204.000,00	16.320,00
22	Fabricato S.A.	108.000,00	8.640,00
23	Gravetal S.A.	10.260,00	205,20
24	Productos Familia	12.240,00	244,80
25	Textiles Rionegro	28.800,00	576,00
TOTAL		406.602	26.852

Los datos presentados en la Tabla 4 corresponden a las 25 empresas más significativas en Medellín y Pereira (Colombia) [9], sin embargo, existen otras empresas que generan mayor cantidad de cenizas que los puestos intermedios de la Tabla 4, y esto sin mencionar otras ciudades y centrales térmicas u otros residuos que por sus características químicas pueden ser viables para la activación alcalina. En Colombia se tiene estimada una producción de 800 mil toneladas de cenizas que desechan anualmente las termoeléctricas del país, pero este residuo tiene mercados de utilización con cementeras locales, aunque se desconoce el porcentaje de utilización. [6]

Sobre la calidad de los carbones consumidos en el circuito industrial del Valle de Aburrá en la Figura 6 se presenta el resultado de evaluar el contenido de cenizas volantes y el poder calorífico de 11 proveedores que extraen carbón mineral en los yacimientos del municipio de Amagá (Venecia-Bolombolo).

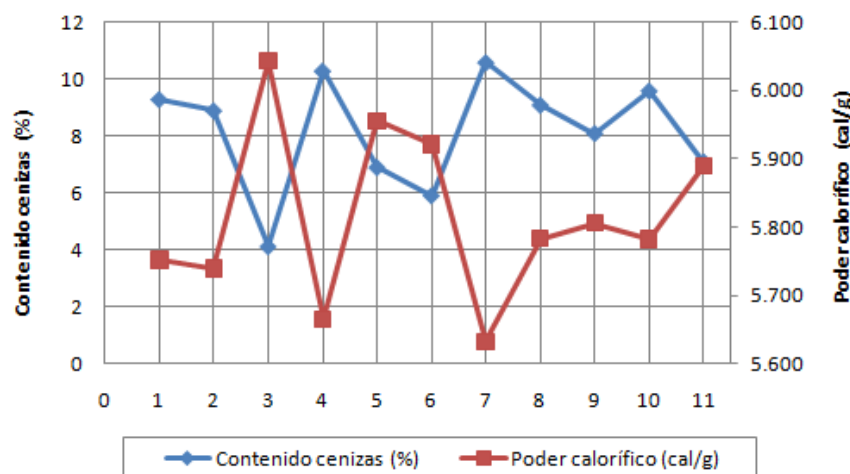


Figura 6. Variación en los contenidos promedios de Cenizas y poder calorífico de los carbones de Amagá [47]

Por otra parte, este tipo de desarrollos se articulan con políticas y programas nacionales e internacionales relacionados con la reducción de gases efecto invernadero, el mejoramiento de la calidad de vida de la población urbana y rural más pobre y la erradicación de la pobreza como es el caso de la meta 11 del séptimo objetivo del milenio sobre la erradicación de los tugurios garantizando la sostenibilidad del medio ambiente y el protocolo de Kioto.

Debido a las situaciones discutidas anteriormente se hace necesaria la investigación en materiales compuestos conglomerantes que permitan obtener buenas características mecánicas y ambientales. Si bien es cierto que las investigaciones con relación a la activación de cenizas llevan más de 50 años, también es cierto que dadas las circunstancias actuales el tema toma mayor interés debido a la tendencia global de dirigir esfuerzos por la sostenibilidad ambiental y específicamente a la reducción de emisiones de gases efecto invernadero.

2.3 ESFERA ECONÓMICA

Dado que la investigación se enmarca dentro del ahorro de energía y materiales por medio del aprovechamiento de subproductos industriales se garantiza la coherencia con el carácter de sostenibilidad ambiental del material propuesto.

La selección de la técnica de aprovechamiento de estos residuos mediante la producción de geopolímeros, se debe a que estos últimos potencialmente pueden ser considerados como materiales sostenibles dado su buen desempeño ambiental gracias a sus flujos de materia y energía y en la medida

que pueden ser más económicos que el cemento Portland [12, 48] y por lo tanto asequibles por diferentes sectores sociales.

Otros autores reportan que la utilización de geopolímeros tiene unos costos similares a los materiales de construcción existentes, pero los beneficios técnicos y ambientales se espera que sean mucho mayores [49].

La implementación de geopolímeros en otros usos podría [49]:

- Mejorar el desempeño a largo tiempo
- Reducir los costos de mantenimiento y capital

Otros autores trabajando con geopolímeros mezclados con arcillas concluyen que estos materiales presentan los siguientes beneficios [50]:

- Su producción requiere ocho veces menos energía
- Requiere menos equipos
- Su producción es menos costosa
- Mayor confort ambiental

Otros autores analizando la comparación entre geopolímeros y productos tradicionales han concluido que los costos de implementación dependen del material de partida. Si se utilizan residuos (cenizas, escorias, etc) con productos químicos grado técnico los costos de implementación serán similares a los costos de materiales tradicionales. Pero si se involucran los costos ambientales (emisiones de CO₂) se beneficia la utilización de geopolímeros [3].

3. ANTECEDENTES

El aprovechamiento de residuos mediante activación alcalina es un tema que actualmente se está investigando a nivel mundial [1, 7, 8, 25, 51, 52] ya que tiene el potencial de ser solución a problemáticas ambientales, desde el punto de vista de encapsulamiento de residuos peligrosos o la producción de materiales económicos para la construcción que generan reducción de emisiones en comparación con la utilización del cemento Portland.

Desde el año 1998 la producción mundial de cenizas de carbón mineral ha sido superior a 390 millones de toneladas anuales. En el futuro la producción de cenizas será superior, especialmente en países como China e India. Para estos dos últimos países se calculó para el año 2010 la cantidad de 780 millones de toneladas anuales de cenizas [41].

En geopolímeros y CBC se han desarrollado múltiples investigaciones alrededor del mundo, algunas de las cuales han alcanzado resultados de resistencias mecánicas y durabilidad que han superado el desempeño de los materiales obtenidos con Cemento Portland Ordinario. Por ejemplo, mediante cenizas de residuos municipales se han alcanzado resistencias a compresión de pastas de 22 MPa a edades de curado de 7 días [28]. Mediante cenizas volantes de centrales térmicas se han logrado resistencias a compresión de hormigones de 59,3 MPa a edades de 28 días y de 69,3 MPa a edades de 90 días [7]. Con hormigones a partir de escorias siderúrgicas (CBC) se han alcanzado resistencias a compresión de 84,9 MPa a edades de 28 días y de 100,6 MPa a edades de 90 días [25]. En cuanto a la durabilidad de los materiales se han medido contenidos de poros permeables entre 4,8 y 9,6% y una absorción total entre 1,7 y 4,4% datos que clasifica dichos materiales como de buena calidad [25].

3.1 GEOPOLÍMEROS COMO MATERIAL SOSTENIBLE

Ambientalmente, los beneficios de los materiales obtenidos por activación alcalina son varios, pero se destacan la reducción de emisión de gases efecto invernadero [7, 8, 31, 45, 53] y la valorización de residuos industriales. Este último aspecto se convierte en una solución a diferentes industrias que deben pagar por disposición final de residuos sólidos potencialmente utilizables, con el agravante que en algunos casos se realiza de una forma técnicamente inadecuada generando problemas ambientales a las comunidades vulnerables y al entorno local [6].

3.1.1 EMISIONES ATMOSFÉRICAS

La fabricación de cemento durante el proceso de clinkerización emite gases efecto invernadero, tales como: CO, CH₄, N₂O y CO₂. Siendo este último el generado en mayor cantidad debido al consumo de combustibles fósiles y a los productos de reacción en la fabricación de materias primas (ver Figura 7).

Combustible + O₂ → CO₂ + Energía + ...

CaCO₃ → CaO + CO₂ (g) (clinker)

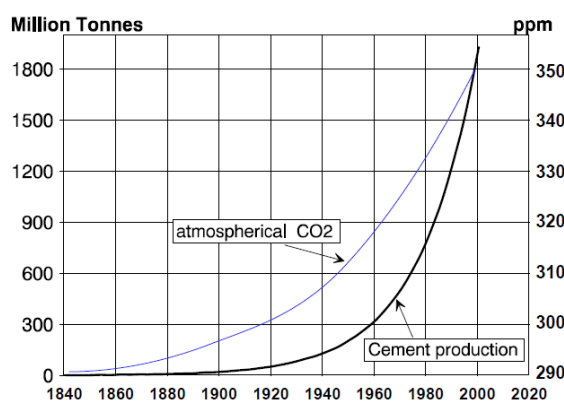


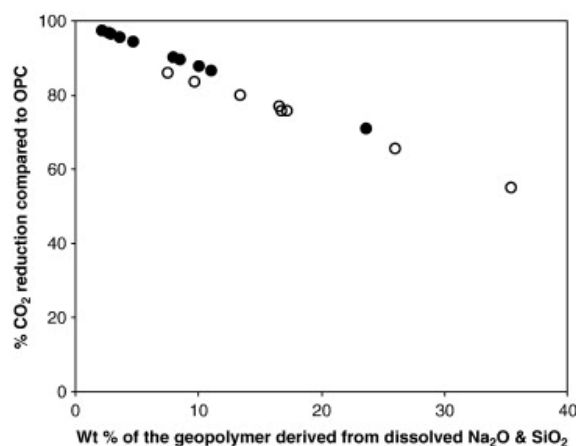
Figura 7. Concentración del CO₂ atmosférico (ppm) y producción mundial de cemento Portland (millones de toneladas) durante los periodos 1840-2000. Fuentes: IPCC – Cembureau [22]

Para la reacción de obtención del clinker se ha estimado una relación promedio de 0,55 Kg CO₂/Kg cemento [22]. Como referencia se sabe que el proceso húmedo consume un 68% más de combustible que el proceso seco. Para Colombia, el porcentaje promedio de clinker utilizado en la fabricación del cemento es del 77,5% [54].

Existen bases de datos como *ECOINVENT DATABASE* que compilan las emisiones de CO₂ de diversos procesos. Por lo tanto se deduce que dependiendo de la tecnología y aspectos propios del lugar de producción hay variaciones entre 0,76 y 1,0 Kg CO₂/Kg cemento debido a la descarbonatación de materia prima y el uso de combustibles inherente a la producción de cemento Portland [19, 21, 27].

En comparación investigaciones de otros autores que se presentan a continuación han determinado que la producción de 1 tonelada de geopolímeros representa una emisión de tan solo el 24% de la producida en la elaboración de una tonelada de cemento Portland [42] y se presentan como una alternativa de producción más limpia [55].

En el caso de los geopolímeros se han realizado algunas aproximaciones para estimar la reducción de emisiones y se ha determinado que pueden alcanzar reducciones entre el 80 y 90% en CO₂ [27, 31]. Concluyendo que la mayoría de las emisiones involucradas en la fabricación de geopolímeros proviene de la producción de los activadores [56].



NOTA: Los puntos llenos representan geopolímeros fabricados a partir de cenizas volantes y los círculos vacíos representan aquellos fabricados a partir del metacaolín.

Figura 8. Aproximación a la reducción de emisiones por la utilización de geopolímeros [56]

Según [56], el activador es el causante de la mayor cantidad de emisiones en la fabricación de geopolímeros, específicamente la producción de hidróxido de sodio, el cual es obtenido mediante una reacción que produce $2\text{NaOH} + \text{Cl}_2$, sin embargo, con el objetivo de evaluar el peor escenario el autor atribuye toda la emisión del proceso al hidróxido de sodio, el cual, según el proveedor es de 1 tonelada métrica CO₂/tonelada de producto.

Con base en lo descrito en el párrafo anterior, en la Figura 8 el autor [56] representa los porcentajes de reducción de emisiones comparados con el Cemento Portland Ordinario. Como se puede observar a menor cantidad de activador, mayor porcentaje de reducción de emisiones, a su vez cada punto representa las relaciones *activador/ceniza* utilizado por diversos autores alrededor del mundo.

3.1.2 GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

La inadecuada disposición de cenizas constituye una fuente de riesgos físicos y ambientales, de los cuales se tienen algunas evidencias en Colombia, algunas de estas se encuentran registradas por [6] en la agenda universitaria de periodismo científico de la Universidad del Valle:

- En Termopaipa (Boyacá), los depósitos de cenizas fueron ubicados sobre los cauces antiguos del río Chicamocha. Esto implica que en el caso de presentarse una creciente, el agua arrastraría las cenizas, inundando la termoeléctrica; esto podría causar a su vez graves daños al lago Sochagota y ocasionar una avalancha de lodo negro que afectaría a la población de Paipa [6].
- En Termoguajira, donde las cenizas -combinadas con agua de mar- fueron arrojadas a la única laguna de agua potable de la región, provocando el deterioro del ecosistema [6].
- En Termotasajero (Norte de Santander), se ubicaron los depósitos de cenizas en un cañón por donde corren los vientos que llegan al pueblo de San Cayetano. Esto ha ocasionado que la pequeña localidad permanezca cubierta de cenizas [6].

Como respuesta a la potencial peligrosidad descrita bajo el convenio de Basilea diferentes autores [28, 31, 57, 58] han evaluado la movilidad de metales pesados en bases geopoliméricas. Para ello han sometido morteros obtenidos mediante la activación alcalina de metacaolín a ensayos de lixiviación TCLP. De esta forma han determinado eficiencias de inmovilización entre el 98,67 y el 99,66% de Cobre y Plomo que son introducidos a las pastas activadas en proporciones de 0,1 al 0,3% en masa con relación al conglomerante [31].

Sin embargo, las rutas en las cuales se presenta la inmovilización de los metales pesados no está completamente clara y se consideran las siguientes rutas: la primera es debido al atrapamiento en la red geopolimérica; la segunda opción, se da por el balanceo de cargas al interior de la estructura y la tercera, por el encapsulamiento físico de precipitados que contienen metales pesados [28]. Los autores concluyen que la inmovilización química predomina sobre la física, y explica la efectividad en la inmovilización de elementos como (Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb) [31] a la vez que explica cómo algunos oxoaniones (As, Mo, Se, Sb, Cr) no son efectivamente inmovilizados, debido a que dichos metales forman compuestos de mayor solubilidad con el

de hidróxido de sodio (utilizado en los ensayos de movilidad TCLP) que con los productos de activación alcalina [58].

3.2 MATERIAL

Desde el punto de vista del material, los geopolímeros presentan varias ventajas frente al Cemento Portland Ordinario principalmente desde la durabilidad [48, 52, 56] sin sacrificar el desempeño mecánico.

Sobre este tema particular, los materiales producidos mediante activación alcalina han presentado los siguientes beneficios [56]:

- Buenas resistencias a la compresión
- Buena resistencia a la abrasión
- Resistencia al fuego y la no emisión de gases tóxicos cuando es calentado
- Alta resistencia a ataques con soluciones de sales y ácidos
- Baja influencia de reacciones álcali-agregado [48, 52]
- Baja conductividad térmica y contracciones
- Buena adhesión a superficies pre-existentes como acero, vidrio, cerámicos
- Buena capacidad de replicar moldes [13]
- Baja corrosión de aceros embebidos debido al alto pH residual

Parte de dichos beneficios se debe al bajo contenido de calcio presente en las matrices formadas, por ejemplo la resistencia a los ambientes ácidos y la reducida formación de fases expansivas [12]. Sin embargo, es importante aclarar que no todas las formulaciones de geopolímeros logran todos los beneficios listados anteriormente, sino que depende de las relaciones químicas y las técnicas de fabricación. Con el adecuado conocimiento de la técnica y las características del material de partida, es posible lograr combinaciones de las características listadas [56].

Como se describió en el marco teórico las características del material de partida son fundamentales para alcanzar materiales geopoliméricos de buenas prestaciones. En la Tabla 5 se presentan características del material inquemado presente en las cenizas de investigaciones alrededor del mundo e inclusive algunos datos de investigaciones realizadas en Colombia.

Tabla 5. Comparativos de material inquemado

Autor	Material de partida	Material inquemado %(P/P)
Steenie, et al [59]	Ceniza volante	1,10
Kovalchuk , et al [60]	Ceniza volante	2,19
Criado [7]	Ceniza volante	3,59

Autor	Material de partida	Material inquemado %(P/P)
Bernal, et al [35]	Metacaolín	1,02
Rodríguez, et al [61]	Metacaolín	1,02
Monzó, et al [62]	Metacaolín	0,44
Maldonado [25]	Escorias siderúrgicas	2,65
Bernal, et al [35]	Escorias siderúrgicas	1,91
Mejía de Gutiérrez, et al [8]	Escorias siderúrgicas	2,08

Como se puede ver en la Tabla 5 los materiales geopoliméricos se investigan a partir de diferentes materiales pero en ningún caso el contenido de material inquemado es superior a 5%. Esta característica será tomada en cuenta mas adelante en la sección de resultados.

Desde el punto de vista del material se ha encontrado que se pueden obtener mejores resultados con metacaolín, o precursores sintéticos, que con cenizas volantes, ya que los productos obtenidos a partir de las cenizas volantes contienen más poros que los obtenidos por el metacaolín [63] y adicionalmente la composición química de las cenizas volantes puede ser más variable, lo que genera problemas en la estandarización de resultados.

3.3 ACTIVACIÓN ALCALINA

La activación alcalina de cenizas es un proceso químico por el cual el componente vítreo de este subproducto industrial es transformado en un material cementoso compacto caracterizado por desarrollo de resistencias mecánicas y de otras propiedades atribuidas a las cerámicas tradicionales (suavidad superficial, vidrio, lustre). La mezcla fresca (pasta formada por ceniza volante y disolución alcalina) es trabajable con bajas relaciones líquido/sólido y fragua en cortos espacios de tiempo [51].

Las soluciones activadoras que se utilizan para la activación alcalina de cenizas son generalmente mezclas de hidróxido de sodio y silicato de sodio, formando la mezcla denominada *waterglass*. La concentración del hidróxido de sodio varía entre 8 y 16 molar [12] y las adiciones de silicato de sodio pueden llegar hasta el 84% en masa de activador [7].

Experimentalmente, se ha determinado que las relaciones ideales según la composición de los activadores son las siguientes [12]:

Tabla 6. Aplicaciones de los geopolímeros según su composición

Relación Si/Al	Aplicación
-------------------	------------

Relación Si/Al	Aplicación
1	* Ladrillos * Cerámicos * Protección al fuego
2	* Cementos y concretos de bajo CO ₂
3	* Compuestos de fibras de vidrio resistentes al fuego * Equipamentos de fundición * Compuestos resistentes al calor, 200°C a 1000°C
>3	* Sellantes para la industria, 200°C a 600°C
20-35	* Compuestos con fibras, resistentes al calor y al fuego

Según [13] la temperatura de curado es función de la policondensación y recomienda temperaturas entre 60 y 95°C. Como ejemplo de ello [7] utiliza una temperatura de 85°C, Sin embargo se reportan trabajos a temperaturas de 30°C, 45°C, 75°C y 90°C, llegando a la conclusión que es probable la producción de geopolímeros a temperatura ambiente [12].

Los tiempos de curado en horno tienen influencia sobre la resistencia mecánica. [64] reporta el comportamiento que se observa en la Figura 9.

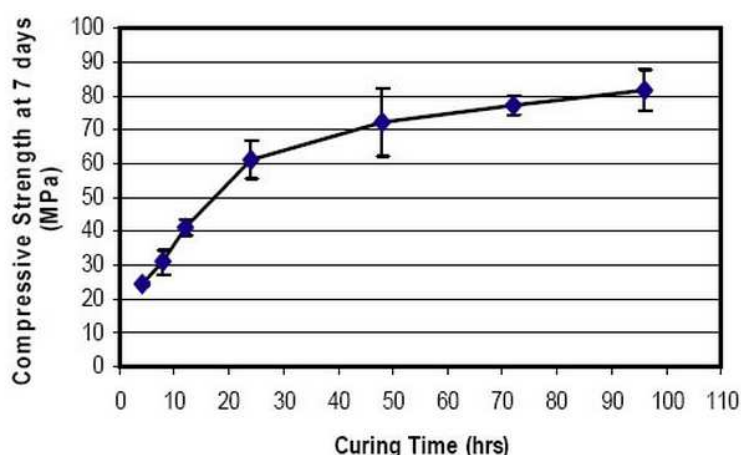


Figura 9. Influencia del curado en horno sobre la resistencia a la compresión [64]

Sobre la composición de los activadores [7] determina que la variación de la relación entre el NaOH y Na₂SiO₃ tiene influencia sobre el grado de polimerización de la sílice soluble, lo cual tiene efecto en su reactividad. De modo que a mayor contenido de NaOH, mayor grado de reactividad dado que la sílice se encuentra en forma de monómeros con mayor capacidad de interactuar con las fases activas del aluminosilicato.

3.3.1 EVOLUCIÓN DE LA REACCIÓN

Sobre los mecanismos con los cuales se produce la activación alcalina algunos autores han determinado que las condiciones experimentales afectan

la composición de los productos y la cinética de la reacción, pero no los mecanismos con los que producen la condensación y endurecimiento del material [65].

En la Figura 10a se puede observar una micrografía de la apariencia de las cenizas volantes antes de iniciar el proceso de activación alcalina y en la Figura 10b aparece la micrografía de una partícula de ceniza volante después de 5 horas de curado en horno a 85°C [65]. Como se puede observar, en las primeras horas de reacción se produce la liberación de partículas que se encontraban encapsuladas y comienza la formación del gel precursor.

En los momentos iniciales de la reacción el gel se caracteriza por tener una baja relación Si/Al y que los autores cuantifican en 1,6 [65, 66]. Dicha relación continúa aumentando a medida que avanza la reacción.

Esta primera etapa se conoce como *nucleación* la cual puede ser dividida en sub-etapas en las cuales se da la *disolución* de las fases vítreas ricas en aluminosilicatos y posteriormente se da la *polimerización* en la cual se aglutinan pequeñas moléculas dando lugar a la *precipitación* del gel precursor

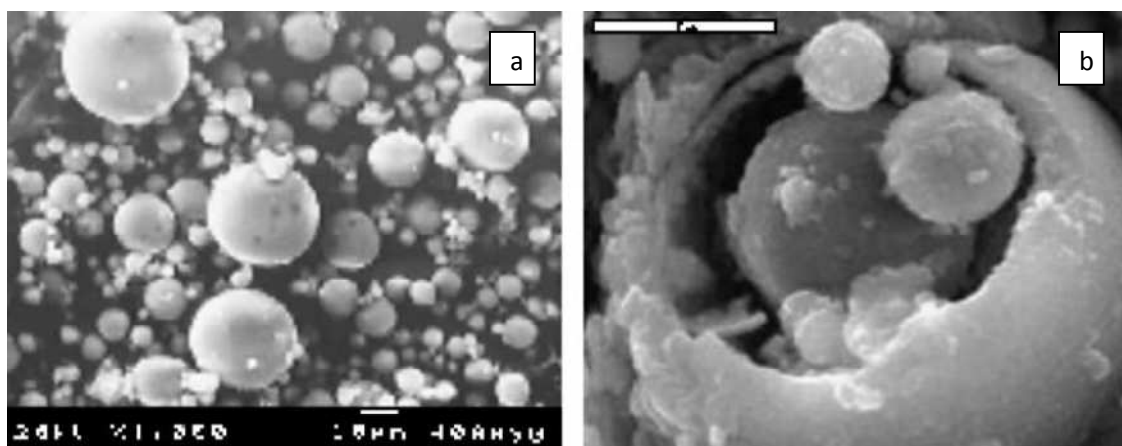


Figura 10. Inicio de la activación alcalina [65]

En la Figura 11 se puede observar una imagen que corresponde a un 50% del grado de reacción, la cual comienza a producir mayor cantidad de precipitados en la superficie de las esferas y llenan los espacios vacíos al interior y exterior de las partículas [65, 66].

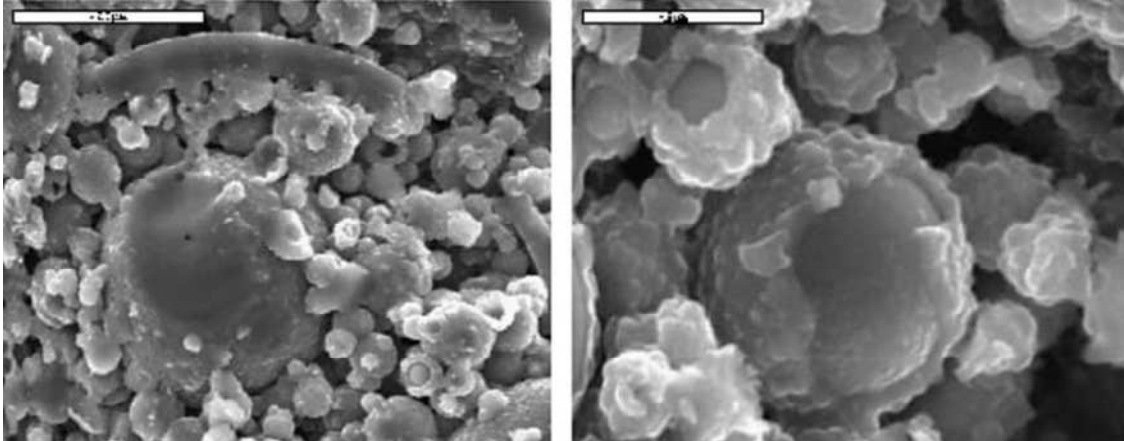


Figura 11. Condensación de productos de reacción [65]

En la Figura 12 se puede observar la matriz cementante formada por la activación alcalina, del mismo modo se observan esferas de cenizas volantes que no alcanzaron a reaccionar adecuadamente y que han quedado embebidas en la matriz.

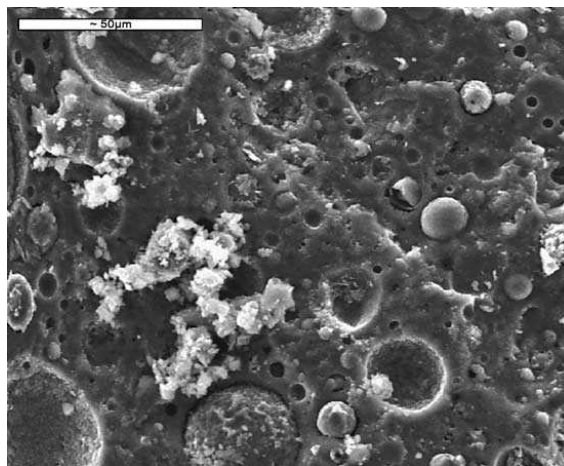


Figura 12. Micrografía 60 días de curado [65]

6 ESTUDIO EXPERIMENTAL

6.1 METODOLOGÍA

Las cenizas que constituyen la materia prima de la presente investigación corresponden a una muestra seleccionada de una empresa textil ubicada en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia).

Estas cenizas son producidas por la combustión de carbón mineral extraído del yacimiento Venecia-Bolombolo y son quemados en calderas industriales con una temperatura en el hogar de 1.200°C. Las cenizas son retenidas en un multiciclón (ver Figura 13) luego de salir de la caldera en la corriente de gas. La temperatura en la chimenea a la salida de la caldera es de 200°C lo que supone una reducción de 1.000°C en pocos segundos y que puede favorecer la formación de fases no cristalinas (reactivas) de sílice.

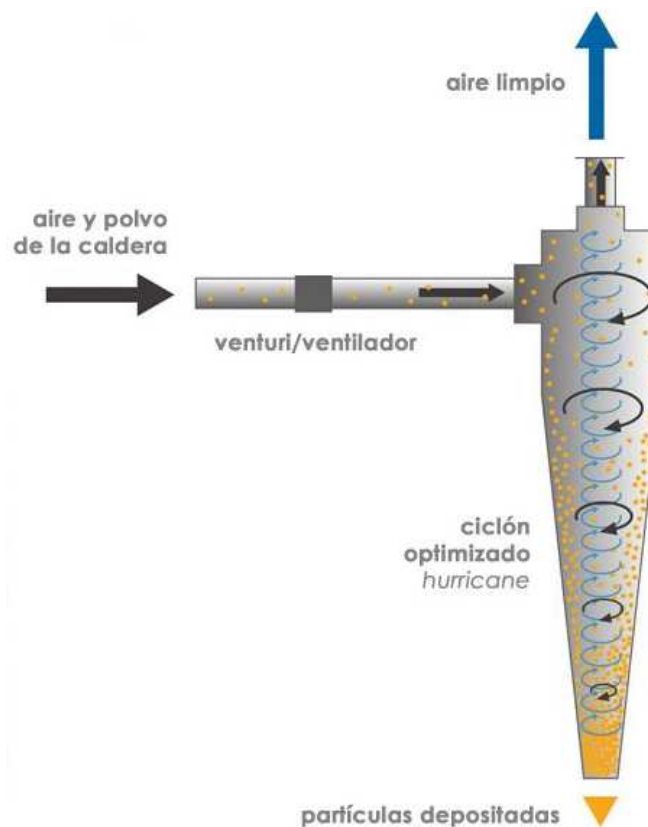


Figura 13. Funcionamiento de un ciclón (imagen modificada de internet) [67]

El material seleccionado fue aquel recolectado en el equipo de control durante una jornada de producción de 2 semanas. Durante dicho periodo no se presentaron situaciones atípicas en el funcionamiento de la caldera y se

recolectaron en total 320 Kg de material que era empacado en bolsas plásticas y llevado al laboratorio.

Se resalta que las condiciones de quemado del carbón son diferentes a las condiciones de quemado en centrales térmicas, por lo tanto y por definición de la norma UNE 83-415-87 el material de trabajo no se define como ceniza volante. Pero al mismo tiempo no puede clasificarse como una ceniza de fondo debido a que el material ha salido “volando” de la caldera y se ha removido de la corriente gaseosa mediante un equipo de control atmosférico.

La arena utilizada fue arena Ottawa, se seleccionó con el objetivo que cumpliera con las especificaciones de arena estándar extraídas de la norma ASTM C778 – 02 [68] y de este modo reducir las variaciones inherentes a la misma.

Tabla 7. Características granulométricas de la arena Ottawa

Tamaño (Malla americana)	Porcentaje que pasa
1,18 mm (No. 16)	100
600 μm	96 – 100
425 μm	65 – 75
300 μm	30 – 30
150 μm	0 - 4
Fuente de la arena	Ottawa, IL

Otras especificaciones sobre las metodologías utilizadas se presentan a continuación

6.1.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

La preparación del mortero se realizó según la norma ASTM C305 [69], la cual establece ubicar las aspas en posición de mezclado y adicionar los materiales al interior del recipiente de la siguiente forma:

- a) Introducir toda la solución activadora en el recipiente de mezclado
- b) Adicionar la ceniza en el recipiente de mezclado y comenzar la mezcla en la velocidad baja (140 ± 5 r/min) por un periodo de 30 segundos
- c) Adicionar toda la arena en un flujo constante por 30 segundos mientras se realiza la mezcla a baja velocidad
- d) Detener el mezclador, cambiar a velocidad media (285 ± 10 r/min) y mezclar por 30 segundos

- e) Detener el mezclado y dejar reposar la mezcla por 1 minuto 30 segundos. Durante los primeros 15 segundos de este intervalo, raspar las paredes del recipiente y depositarlo en el centro del recipiente. Durante el intervalo de tiempo restante cubrir el recipiente con una tela.
- f) Finalizar con un mezclado por 1 minuto a velocidad media (285 ± 10 r/min)



Figura 14. Batidora Hobart

Posterior al mezclado se procede al llenado de los moldes según la metodología descrita en la norma ASTM C 109/C 109M [10], la cual describe lo siguiente:

- a) El inicio del vaciado del material, previamente mezclado, debe comenzar lo más rápidamente posible y en ningún caso debe tomar más de 2 minutos 30 segundos.
- b) Ubicar una capa de mortero en cada uno de los compartimientos de un espesor de aproximadamente la mitad de la profundidad del molde (25 mm).
- c) Apisonar la capa de mortero 32 veces en 10 segundos haciendo cuatro rondas como se ilustra en la Figura 15. La presión debe ser la necesaria para el llenado uniforme de los moldes
- d) Terminar de llenar el molde con mortero en cada uno de los compartimientos. El molde debe ser aplanado con palustre al final del proceso.

- e) Introducir los especímenes en sus moldes al horno para comenzar el curado a las temperaturas indicadas por el modelo experimental.

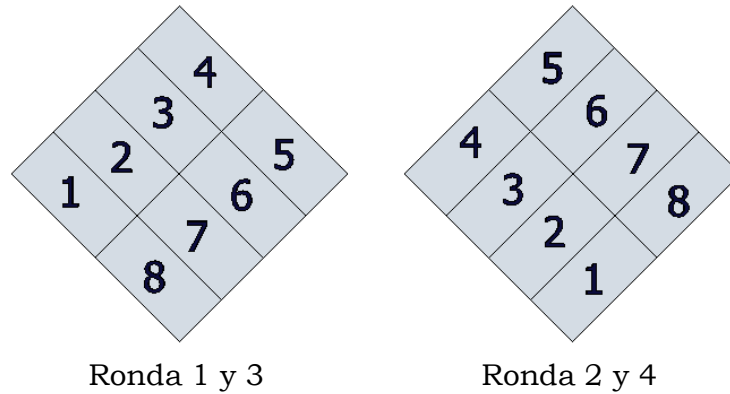


Figura 15. Orden de apisonamiento para el moldeo de los especímenes [10]

6.1.2 PREPARACIÓN DE ACTIVADORES

En la preparación de las soluciones activadoras se utilizó Hidróxido de sodio y silicato de sodio, ambos grado comercial. La preparación de los activadores siempre se realizó según la aleatorización del modelo, con el fin de satisfacer los requisitos estadísticos.

Los activadores se adicionaron de forma tal que el flujo fuera aproximadamente constante en todos los morteros e igual a 75% y que los módulos de la activación estuvieran dentro de los rangos de trabajo para este tipo de materiales con bajo contenido de CaO [7, 12].

La selección de los niveles del factor módulo S/A se establecieron según la revisión del estado del arte de diversas investigaciones que obtienen geopolímeros a partir de cenizas volantes y metacaolines, las cuales trabajan: para metacaolín con rangos entre 3,0 – 4,0 [61]; 2,5 – 5,01 [70]; para cenizas volantes 2,14 – 2,38 [7]; Según Davidovits (1982) el rango para la producción de sialatos está entre 3,5 – 4,5 [13].

SILICATO DE SODIO

Como fuente de silicatos se utilizó el producto fabricado por una empresa local descrito en la Tabla 8.

Tabla 8. Características Silicato de Sodio comercial

PROPIEDAD	MÍNIMO	MÁXIMO
Densidad (°Be)	40,8	43,5
Relación (SiO ₂ : Na ₂ O)	3,0	3,27

PROPIEDAD	MÍNIMO	MÁXIMO
Na ₂ O (%)	8,80	9,86
SiO ₂ (%)	27,50	30,20
Sólidos Totales (%)	36,79	39,73
pH	11,5	

El silicato descrito en la Tabla 8 es un líquido viscoso, ligeramente grisáceo e inodoro, según la información del proveedor es comúnmente utilizado como ligador de cementos refractarios en la industria de la construcción aportando resistencia a altas temperaturas y a los ácidos. También es útil en la solidificación de suelos donde estos son porosos, permeables al agua ó donde el suelo no tiene fuerza suficiente para soportar carga.

De acuerdo con [7] es de esperar que en este producto se tenga un alto grado de polimerización y que a medida que disminuye la relación S/N dicho grado disminuya hasta llegar a un punto en que solo estén presentes sus respectivos aniones (monómeros).

HIDRÓXIDO DE SODIO

El hidróxido de sodio utilizado es un producto sólido importado, dicho producto es grado comercial de 98% de pureza. El hidróxido de sodio constituye la fuente de sodio, Na, necesaria para producir las relaciones deseadas en el geopolímero deseado, así como influir en el grado de polimerización de las especies en el silicato de sodio.

Así mismo, su función es la de disolver las fases vítreas de la ceniza y el catión sirve de elemento estructural en la formación del polímero. Su concentración en el activador influye en el grado de polimerización del silicato y su estabilidad para reaccionar con los Al₂O₃ solubilizados.

La concentración del hidróxido de sodio varió entre 20,0% (P/P) y 40,0% (P/P) con el objetivo de proporcionar las concentraciones de que garanticen los requisitos del modelo descrito en la Tabla 12.

SOLUCIONES ACTIVADORAS

La Tabla 9 resume la cantidad de silicato de sodio e hidróxido de sodio utilizado para cada muestra. En ella se presenta la información necesaria para replicar los activadores, así como la relación molar entre SiO₂ y Na₂O del sistema.

Tabla 9. Formulación Soluciones activadoras

Código	Concentración NaOH % (P/P)	Relación Silicato/NaOH	Módulo SiO ₂ /Na ₂ O
N4S0	40	0,0%	0
N2S0	20	0,0%	0
N2S15	20	15,0%	0,32
N3S75	30	7,5%	0,10
N4S15	40	15,0%	0,16

Como ejemplo, para la preparación de 100 g de solución N4S15 se utiliza 85 gramos de solución NaOH al 40 % (P/P) y 15 g de solución de silicato de sodio comercial descrito en la Tabla 8.

El módulo SiO₂/Na₂O es una relación molar calculada con base en la composición química del silicato utilizado (Tabla 8), la concentración de hidróxido de sodio y la relación Silicato/NaOH.

La concentración se verificó mediante titulación con ácido clorhídrico. El control se realizó sobre el hidróxido de sodio, dado que cuando se realiza la neutralización del *waterglass* se forma un gel que no permite determinar con certeza el punto de quiebre.

6.1.3 DETERMINACIÓN DE FLUJO

Para garantizar el flujo de control seleccionado del 75% se realizaron pruebas en la mesa de flujo según la norma ASTM 1437-01 [11]. Dicho procedimiento se resume a continuación:

1. Limpiar y secar la mesa de flujo.
2. Posicionar en el molde una capa de aproximadamente 25mm en el centro y golpear 20 veces con el pisón. La presión debe ser la necesaria para garantizar el llenado uniforme del molde.
3. Terminar de llenar el molde con el mortero y apisonar como en la primera capa.
4. Nivelar con espátula la parte superior cortando los excesos de material.
5. Limpiar la mesa de flujo con cuidado de no dejar humedad.
6. Retirar el molde pasado un minuto de la operación de mezclado.

7. Dejar caer la mesa 25 veces en un tiempo de 15 segundos.
8. Medir el diámetro en 4 puntos de la mezcla expandida.
9. El flujo se determina como el incremento resultante expresado como un porcentaje del diámetro de la base original.



Figura 16. Mesa de flujo

6.1.4 CURADO DE LAS MUESTRAS

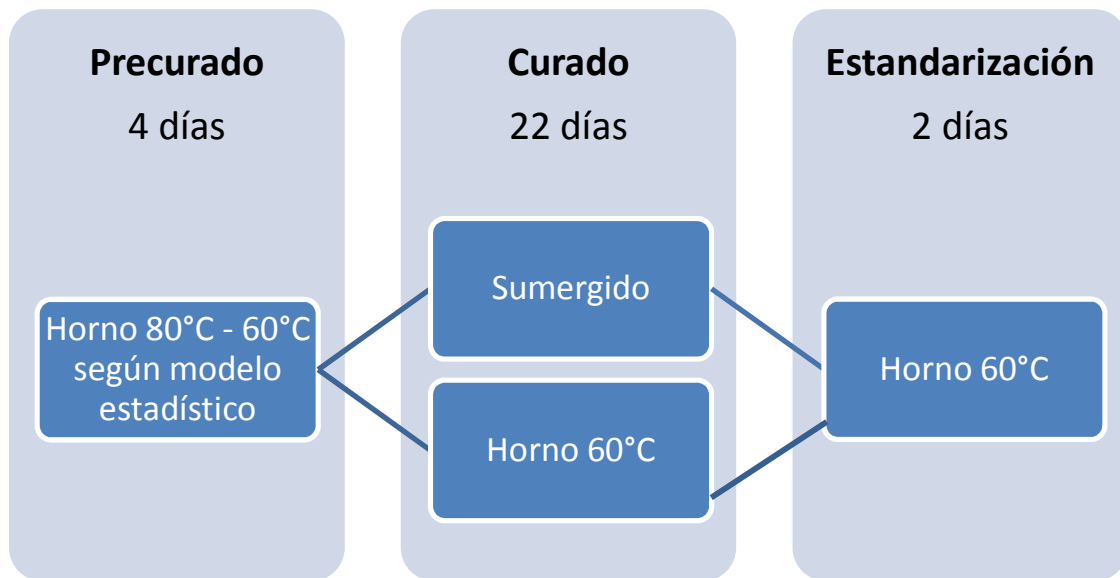
Las temperaturas de curado se seleccionaron con base en el estado del arte, según el cual, las temperaturas típicas de curado varían entre 40 y 80°C.



Aprovechamiento de Cenizas de Carbón Mineral producidas en la industria local como material conglomerante en la construcción

Figura 17. Horno de curado

El curado de las muestras se divide en dos momentos posterior a la elaboración de las mezclas: el primero, es un precurado de 4 días en horno a las temperaturas constantes indicadas en la Tabla 12, posterior a dicha etapa se realiza un desencofrado de las muestras y se someten 22 días al curado correspondiente hasta el día de la evaluación mecánica del material. Un día antes de la falla se toman las muestras sumergidas y se llevan a un curado en horno para eliminar la humedad durante un periodo de 2 días.



TIPOS DE CURADO

Los tipos de curado que se trabajaron en esta tesis son:

Curado sumergido: el cual consiste en llevar las muestras a recipientes en los cuales se sumergen en agua del acueducto municipal.

Curado en Horno: el cual consiste en llevar las muestras a hornos calibrados a las temperaturas establecidas en el modelo estadístico.

Curado en desecador: este tipo de curado solo se utilizó en los ensayos preliminares a los que hace referencia la Figura 35. Consiste en llevar las muestras a deshumificadores (desecadores) con base en sílica.

Curado en cuarto húmedo: este tipo de curado solo se utilizó en los ensayos preliminares a los que hace referencia la Figura 35. Consiste en llevar las muestras a un cuarto húmedo de condiciones estables de temperatura y humedad relativa mayor a 90%.

6.1.5 ENSAYO A COMPRESIÓN

Para la ejecución de los ensayos a compresión se utilizó una prensa electrónica HM 3000 (ver Figura 18) del centro de laboratorios de la Universidad de Medellín.

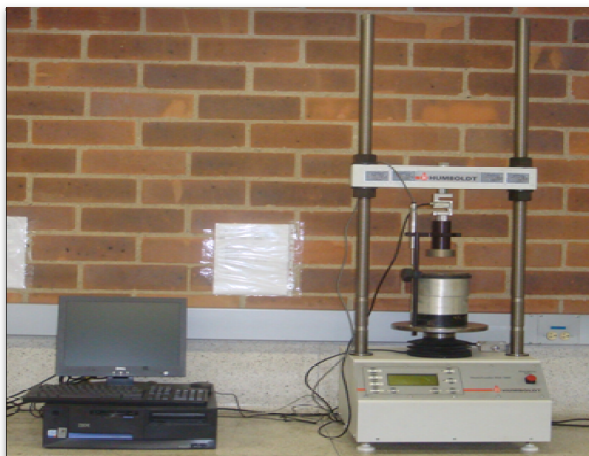


Figura 18. Prensa electrónica HM 3000

Los parámetros de la prensa electrónica utilizada para los ensayos de compresión se configuraron como aparece en la Tabla 10

Tabla 10. Configuración prensa electrónica

Parámetro	Valor
Velocidad del motor	1 mm/min
Celda de carga	50 KN
Inicio de toma de datos	0,02 KN
Parada de seguridad	40 KN

La velocidad de desplazamiento se estableció en este valor referenciado en la norma ASTM C109/C 109M [10].

La prensa electrónica con la celda de 50 KN utilizada en la presente investigación tiene una precisión de 0,001 KN⁵

6.1.6 DETERMINACIÓN DE MATERIAL INQUEMADO

Para la determinación del material inquemado se sometió la muestra a una temperatura de 1050°C por un periodo de 1 hora [71]. Dado que no se contaba con una cámara de calentamiento según se indica en la metodología de la referencia [71] se decidió introducir la muestra al horno antes del

⁵ Información suministrada por el centro de laboratorios de la Universidad de Medellín

precalentamiento requerido. Esto con el objetivo de eliminar la humedad remanente durante las 2 horas iniciales que toma el calentamiento de la mufla.

Posterior a la calcinación se sacó la muestra y se llevó al desecador por 10 minutos, luego de los cuales se realizó su pesaje en balanza analítica.

El material inquemado se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Material Inquemado (\% en peso)} = \frac{n_2 - n_3}{n_2 - n_1} \times 100$$

Donde n_1 : masa del cerámico vacío (g)
 n_2 : masa del cerámico más la muestra (g)
 n_3 : masa del cerámico y la muestra calcinada

6.1.7 DETERMINACIÓN DE FASES VÍTREAS POR MEDIOS QUÍMICOS

Para la determinación de las fases vítreas se realizó el siguiente procedimiento según la norma UNE EN-196-2-06 y la norma UNE 80-225-93:

1. Adicionar 100 g de ceniza a una solución 1M de HCl, el volumen de la solución debe ser tal que supere la cantidad de ceniza. Dejar durante 3 horas con agitación.
2. Filtrar el sólido y adicionarlo a una solución de KOH al 25% en peso y que supere la cantidad de ceniza filtrada.
3. Dejar durante 16 horas y montar la solución a ebullición durante 4 horas.
4. Realizar filtración y hallar cantidad de residuo insoluble %RI.
5. Mezclar el sólido RI con Na_2CO_3 en la misma proporción a 1.100°C durante 3 horas.
6. Sacar la muestra y adicionar un volumen de HCl que supere la cantidad de la ceniza.
7. Realizar filtración y calcular SiO_2 insolubilizada y SiO_2 calcinada.
8. Calcular la S reactiva final.

6.1.8 COMPOSICIÓN QUÍMICA

La composición química se determinó mediante Fluorescencia de Rayos X. La FRX es una técnica en la cual los minerales, tal cual o, mejor, finamente divididos dispersos en un vidrio alcalino, se bombardean con una radiación de alta frecuencia y baja longitud de onda, la cual contiene energía suficiente para inducir una emisión fluorescente, debida a la excitación de los electrones internos de las orbitas de los elementos presentes; estos electrones emitidos por la muestra se recogen por un detector oportuno, y la señal generada se asocia a la posición de la muestra o del detector mismo, estableciendo una intensidad relativa de señal que se contrasta con la de un patrón [72].

Para el análisis de las muestras se utilizó un equipo FRX marca PHILIPS, modelo PW 2400 con tubo de 3kW.

6.1.9 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

La difracción de rayos X está basada en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación. Los rayos X tienen longitudes de onda Angstrom, del mismo orden que las distancias interatómicas de los componentes de las redes cristalinas. Al ser irradiadas las muestras sobre la muestra a analizar, los rayos X se difractan con ángulos que dependen de las distancias interatómicas [61].

La caracterización mineralógica de las cenizas se realizó en un DRX mediante equipo de referencia PANalytical X'Pert PRO MPD, en un intervalo 2θ entre 4° y 70° , con un paso de 0.02° y un tiempo de acumulación de 30 s, con radiación $K\alpha$, potencia 45 kV y corriente 40 mA. Para la identificación de las fases cristalinas se utilizó la base de datos PDF 2 mediante software X'pert HighScore. (Ver Figura 19).



Figura 19. Equipo de análisis difractométrico de rayos X.

6.2 APROXIMACIÓN AL CICLO DE VIDA

Según la norma ISO 14040 la Evaluación de Ciclo de Vida (ECV) se define como una técnica para evaluar los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados con un producto, mediante las siguientes actividades [73]:

- Conformar un inventario de entradas y salidas relacionadas a un sistema.
- Evaluar los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas
- Interpretar los resultados del inventario y las fases de impacto en relación con los objetivos del estudio.

Así mismo, la norma ISO 14040 reconoce que la técnica presenta las siguientes limitaciones [73]:

- La naturaleza de las selecciones y suposiciones que se hacen en la ECV (por ejemplo la fijación de los límites de un sistema, la selección de las fuentes de datos y las categorías de los impactos) pueden ser subjetivas, por lo que se deben determinar claramente.

- Los modelos utilizados para el análisis del inventario o para evaluar los impactos ambientales están limitados por sus propios supuestos, y es posible que no estén disponibles para todos los impactos potenciales o para todas las aplicaciones.
- Los resultados de los estudios de ECV enfocados hacia temas mundiales pueden ser inapropiados para las aplicaciones locales; es decir, las condiciones regionales o mundiales podrían no representar adecuadamente las condiciones locales.
- La exactitud de los estudios de ECV puede estar limitada por la falta de acceso o de disponibilidad de los datos pertinentes, o por la calidad de los datos, por ejemplo espacios, tipos de datos, agregación, promedio, datos específicos para un sitio.
- La falta de dimensiones espaciales y temporales en los datos del inventario usados para la evaluación del impacto introduce incertidumbre en los resultados del impacto. Esta incertidumbre varía con las características espaciales y temporales de cada categoría de impacto.

6.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

El modelo experimental que se presenta a continuación fue desarrollado en el paquete estadístico STATGRAPHICS ®. El objetivo principal es realizar una corrida exploratoria de cribado con base en las variables definidas según el estado del arte y las observaciones de los estudios preliminares, para esto se utilizó un modelo factorial fraccionado de resolución V, con las características descritas en la Tabla 11.

Tabla 11. Variables y niveles modelo experimental

Factores	Bajo	Alto	Continuo
Concentración NaOH, %(P/P)	20,0	40,0	Sí
Na ₂ SiO ₃ , % en el activador	0,0	15,0	Sí
Temperatura, °C	60,0	80,0	Sí
Tipo de curado	Sumergido	Horno 60°	No
Relación Arena/Ceniza	0,5	1,5	Sí

En general los modelos factoriales, son aquellos diseños que permiten la evaluación de los factores principales y las interacciones posibles entre dichos factores, sin embargo su ejecución requiere una gran cantidad de corridas experimentales dado que logra su información a partir de la combinación entre todos los factores con todos sus niveles. Es por esto último que se ejecutó un modelo factorial fraccionado de resolución V, el cual permite

evaluar varios factores y sus interacciones en un menor número de corridas sin suponer confusiones (alias) o grandes pérdidas de información [74].

Como se puede observar en la Tabla 11 no todas las variables son continuas, por lo tanto no se puede utilizar la metodología de superficie de respuesta con el actual planteamiento de diseño experimental.

Adicionalmente en el diseño se incluyeron 4 puntos al centro para asignarle grados de libertad al error, y permitir la ejecución del modelo estadístico.

La variable respuesta seleccionada es la compresión para una edad de curado de 28 días. En la Tabla 12 se presentan los tratamientos experimentales y el código de cada muestra.

Tabla 12. Descripción del modelo experimental

	Código	Temp. (°C)	Relación Arena/Ceniza	[NaOH] % (P/P)	Relación Silicato/NaOH	Tipo de curado
1	T8A5N4S0S	80	0,5	40	0,0%	Sumergido
2	T6A5N2S0S	60	0,5	20	0,0%	Sumergido
3	T6A5N2S15H	60	0,5	20	15,0%	Horno
4	T7A10N3S75H	70	1,0	30	7,5%	Horno
5	T6A5N4S15S	60	0,5	40	15,0%	Sumergido
6	T8A15N4S15S	80	1,5	40	15,0%	Sumergido
7	T7A10N3S75S	70	1,0	30	7,5%	Sumergido
8	T6A5N4S0H	60	0,5	40	0,0%	Horno
9	T6A15N2S0H	60	1,5	20	0,0%	Horno
10	T8A15N4S0H	80	1,5	40	0,0%	Horno
11	T8A5N2S0H	80	0,5	20	0,0%	Horno
12	T8A15N2S0S	80	1,5	20	0,0%	Sumergido
13	T8A5N4S15H	80	0,5	40	15,0%	Horno
14	T6A15N4S0S	60	1,5	40	0,0%	Sumergido
15	T8A5N2S15S	80	0,5	20	15,0%	Sumergido
16	T7A10N3S75S	70	1,0	30	7,5%	Sumergido
17	T6A15N2S15S	60	1,5	20	15,0%	Sumergido
18	T6A15N4S15H	60	1,5	40	15,0%	Horno
19	T7A10N3S75H	70	1,0	30	7,5%	Horno
20	T8A15N2S15H	80	1,5	20	15,0%	Horno

Resumiendo se ha diseñado un modelo factorial de media fracción el cual estudiará los efectos de 5 factores en 20 corridas experimentales. El diseño deberá ser corrido en un solo bloque y el orden de los experimentos ha sido

completamente aleatorizado, lo cual aportará protección contra el efecto de variables ocultas.

El modelo seleccionado quedó configurado como $2v^{5-1}$ el cual se ejecutó con 16 corridas experimentales sin duplicado, sin embargo, debido a la inclusión de cuatro puntos al centro el total de los tratamientos es igual a 20. Este modelo fue seleccionado debido a su capacidad de evaluar tanto las interacciones (en el caso de encontrarse alguna) como los efectos principales. Del mismo modo, se seleccionaron este número de variables con el objetivo de garantizar la resolución V del modelo.

La resolución V del modelo es una característica de diseño que se escogió de forma premeditada. El objetivo es no generar confusiones que dificulten la asignación del efecto de cada variable. Es decir, gracias a la resolución alcanzada en el modelo, se puede determinar con certeza los efectos de las interacciones dobles y los efectos principales sin generar confusiones. Esto se logra gracias a que se han descartado los efectos de las interacciones triples, cuádruples y quintuple. Dicho supuesto es válido y utilizado en el estudio de variables “naturales”, ya que en la naturaleza la probabilidad de encontrar dichos grados de interacción es muy baja, situación que no se cumple en otro tipo de fenómenos como aquellos que pretenden simular variables económicas.

Con base en lo anterior se concluye que al momento de analizar la ANOVA, los efectos principales solo se pueden confundir con la interacción cuádruple (para garantizar la resolución V del modelo, ej: A * BCDE), la cual como se describió en el párrafo anterior es improbable y por lo tanto el efecto se asignará únicamente al efecto principal. Lo mismo sucede con la interacción doble que se confunde con la interacción triple (ej: AB * CDE), y por lo tanto el efecto de dicha confusión se atribuye al efecto de la interacción doble.

Acompañado de la ANOVA que analiza este modelo se ejecuta un análisis de medias para encontrar las diferencias estadísticas mínimas significativas por medio del *LSD* de Fisher (por sus siglas en inglés). Del mismo modo se puede extraer información como el grado de representación que tiene el modelo y el efecto que tienen las variables no incluidas sobre las respuestas del fenómeno.

8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De los ensayos preliminares se concluye que:

- A pesar de no desarrollar altos valores en cuanto a las resistencias mecánicas, el material tiene un comportamiento adecuado ya que los tipos de falla observados en los ensayos de compresión, tracción y flexión indican una adecuada distribución de los esfuerzos al interior de estas.
- El efecto del curado es estadísticamente significativo con relación a la resistencia mecánica a compresión para el material obtenido bajo las condiciones descritas en la metodología. La temperatura seleccionada se varió entre 60 y 80°C, sin embargo, existen resultados de otras investigaciones en los cuales se ha reportado curado a temperatura ambiente [12]. Según estudios preliminares, con las cenizas objeto del presente estudio, el curado a temperatura ambiente es posible, pero requiere mayor cantidad de tiempo por lo que se descartó para la presente investigación.

La caracterización mineralógica del material permite identificar la tenardita (Na_2SO_4). Algunos autores han encontrado que dicho compuesto es causante de bajas resistencias mecánicas, eflorescencias y posible precursor de fases expansivas. Por ejemplo, Criado reporta que los sistemas (mezclas) con contenidos de Na_2SO_4 presentan una cinética de reacción diferente a aquellos sistemas en ausencia de estos compuestos, e incluso se reporta que el grado de reacción es menor y permanece estable a partir de los siete días de reacción.

Criado reporta que la presencia de Na_2SO_4 en compuestos geopoliméricos tiene influencia en el grado de reacción y que a su vez este puede tener influencia en el grado de reacción [7].

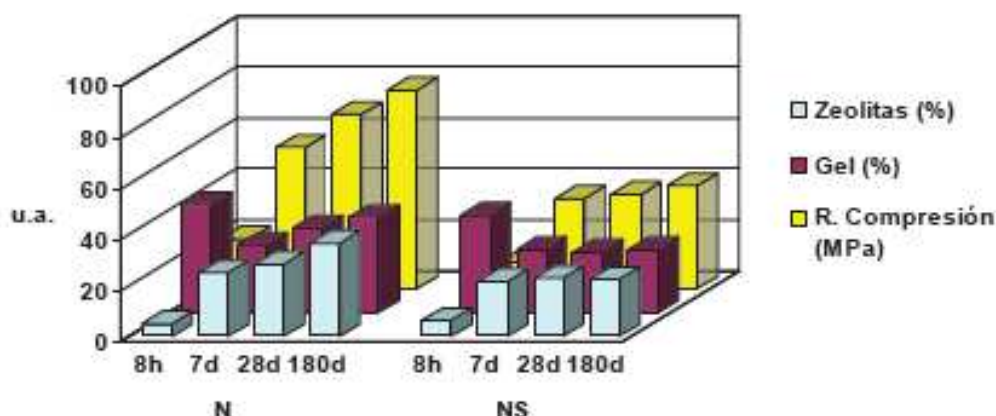


Figura 53. Efecto de la adición de Na_2SO_4 en compuestos geopoliméricos [7]

Del mismo modo, la presencia de Na_2SO_4 explica el pH encontrado durante ensayos preliminares en los cuales al ser sumergida una muestra de cenizas en agua, esta solución arrojó pH's superiores a 9,0 unidades, situación que se consideró anormal debido a la presencia de aluminio y silicio.

Analizando los resultados de FRX reportados en la Tabla 14 se concluye que el material de partida presentó deficiencias en su composición debido a los altos contenidos de material no quemado. Es por ello que los materiales producidos tienen bajas resistencias mecánicas.

El material de partida presentó una relación Si/Al igual a 1,07. En futuras investigaciones se sugiere evaluar la variación de la relación molar S/A mediante la adición de una componente rica en Al_2O_3 y analizar su efecto en el comportamiento mecánico.

Es muy importante destacar que solo se tuvo en cuenta una variable en el mortero (fluidez). Se debe seguir el tema de la discusión teniendo en cuenta factores como la retención y fraguado, que son dos variables fundamentales en los aglomerantes.

Desde el punto de la caracterización física el material de partida presenta deficiencias debido al alto contenido de material inquemado. Dicho material fue determinado como igual a 34% en los laboratorios de la Universidad de Medellín e igual a 41,9% en los análisis de FRX. Este valor es muy alto si se toma como referencia un valor óptimo menor a 5% [7] y es la principal desventaja del material para obtener mayores resistencias mecánicas. Es por ello que los objetivos del material fueron 5MPa y no valores superiores que implican altos desempeños mecánicos como los alcanzados en otras investigaciones a nivel mundial.

Los morteros elaborados requieren mayor investigación desde el punto de vista físico y químico con el fin de determinar aspectos como la porosidad y microporosidad que ha sido reportado para los geopolímeros formados a partir de cenizas volantes. La evaluación de dichos aspectos puede ayudar a comprender mejor los resultados obtenidos.

El flujo de los morteros frescos es un parámetro que depende de múltiples factores y su influencia sobre la resistencia no ha sido determinada en este estudio. Su efecto se controló fijando el flujo de las mezclas en 75% para evitar el efecto de la fuerza de compresión durante el vaciado de las muestras.

El modelo estadístico empleado explica la variación de la resistencia a compresión (28 días) en un 84,85% según lo reportado en la Tabla 25. Dicho modelo evidencia la interacción existente entre la ceniza y el activador alcalino con un nivel de confianza del 95%. Sin embargo, luego de la simplificación del modelo se obtiene un ajuste del 76,89%.

Las emisiones asociadas al producto obtenido mediante la activación alcalina de las cenizas objeto de estudio se consideran altas en comparación con los materiales que se pueden obtener de otras cenizas. Esto se debe a que el proceso de curado del material en horno representa cerca del 30% de las emisiones asociadas. Adicionalmente el activador que presentó los mejores resultados mecánicos tiene la mayor carga ambiental evaluada (40% P/P de NaOH) lo que justifica los altos valores de emisiones asociadas al producto (0,394 Kg CO_s/Kg de material).

Desde el punto de vista ambiental la utilización de este tipo de material supone un beneficio, dado que el aprovechamiento de un residuo reduce su potencial de contaminación y agotamiento de recursos naturales. Sin embargo, la utilización aún requiere de análisis de movilidad de los posibles contaminantes que se puedan encontrar en el material.

La metodología utilizada permitió desarrollar un estudio exploratorio así como identificar las variables e interacciones que mayor influencia tienen en la resistencia mecánica de los materiales obtenidos. Del mismo modo, se pudo evaluar el desempeño ambiental del material desde el punto de vista de las emisiones de CO₂ tal y como fue propuesto al inicio del proyecto. Las metodologías se asumieron con base en normas internacionales, utilizando equipos calibrados y ensayos químicos contratados en laboratorios reconocidos. Sobre cada uno de los objetivos específicos planteados se ha logrado concluir tal y como se observa en la sección de conclusiones del presente trabajo de investigación.

9 CONCLUSIONES

Las cenizas utilizadas en la presente investigación presentaron deficiencias físicas y químicas que explican las resistencias mecánicas alcanzadas. Entre las deficiencias encontradas están: i) tamaños de partícula muy grandes ii) altos contenidos de material inquemado.

El material puede ser mejorado mediante tratamientos preliminares como el tamizado. Sin embargo la presente investigación toma el material en las mismas características como se emite en una industria local, por lo tanto, la muestra seleccionada representa las condiciones del material crudo emitido al momento del estudio. Adicionalmente un pretratamiento mediante tamizado implicaba: i) mayor consumo energético, ii) eliminación de una fracción significativa del material por lo que se reduciría el impacto en la búsqueda de una solución ambiental para dicho residuo.

Posterior a la activación alcalina se observaron fases amorfas en el material. Sin embargo se detectaron y semicuantificaron cambios mineralógicos mediante el software X'Pert HighScore®. Según dicho software las fases detectadas corresponden a zeolitas de Aluminio Silicato de Sodio Hidratado N-A-S-H que han sido reportadas en estudios de otros autores.

Se utilizó un modelo factorial fraccionado el cual permite encontrar las interacciones entre el activador alcalino y la ceniza. Dicho modelo permite incluir 5 variables (efectos principales), por lo que es una técnica adecuada para la exploración de un fenómeno como el que se pretende analizar. El modelo se ajustó en un 76,9% al fenómeno luego de la simplificación. Dicho valor se considera bueno, dado que existen variables significativas que no se estandarizaron y que pueden generar variabilidad por fuera del modelo.

Existe una o varias variables que pueden explicar el la variación de la resistencia mecánica a compresión en un 20% adicional y que no se encuentra en el modelo. Dicho 20% también incluye error experimental, así como variabilidad de la muestra de cenizas utilizada.

Se considera positivo fijar la fluidez de los morteros como condición experimental dado que reduce el efecto de la cantidad de líquido en los morteros elaborados. Esto reduce los efectos en la resistencia ocasionados por la diferencia de densidades y viscosidad de los activadores utilizados. Este es un aspecto que no se había observado las investigaciones consultadas como soporte de esta tesis.

Se evaluó la resistencia mecánica de los materiales obtenidos a la edad de 28 días bajo los parámetros descritos por el modelo estadístico. Como resultado de este ejercicio se alcanzaron resistencias máximas de 4,7 MPa y 3,7 MPa antes y después de la simplificación del modelo estadístico.

Los resultados obtenidos vislumbran su potencial utilización en elementos que no soporten carga, no se puede concluir sobre su utilización en elementos como adoquines o similares dado que la variabilidad en un proceso de escalado no se ha determinado.

El tipo de falla que presentaron las muestras es adecuado e indica que las fuerzas que se generan al interior del material se disipan en forma adecuada. Las muestras presentaron fallas cónicas.

La utilización de geopolímeros supone un riesgo ambiental desde el punto de vista de la movilidad de los potenciales contaminantes. Es por ello que se hacen necesaria la investigación en la movilidad de metales pesados en los materiales geopoliméricos.

Se calculó una emisión de 0,39 Kg CO₂/Kg de mortero activado bajo la metodología utilizada para obtener el material con la mejor resistencia encontrada en el modelo estadístico. Dicho valor se encuentra en los rangos trabajados por otros autores, pero sirve simplemente como referencia dado que no se realizaron escalados del material que permitan obtener valores ajustados a la realidad en una línea de producción.

La fase que aporta la mayor participación en las emisiones asociadas al proceso se debe a la incorporación de las materias primas (NaOH) dado que su utilización acarrea una emisión de 1,4 Kg CO₂/Kg de NaOH utilizado. En la literatura consultada se observan procesos de activación bajo concentraciones de 20 % P/P por lo que las emisiones asociadas a la producción de dichos elementos es inferior a las producidas en la activación de los materiales de la presente investigación. Esto se explica en las características físicas del material de partida utilizado.

El material que puede ser obtenido con la utilización de los materiales de partida analizados y bajo las metodologías utilizadas tiene una capacidad a compresión entre 3 y 5 MPa. Dichas resistencias permiten la elaboración de elementos no estructurales, con potencial en elementos decorativos.

7 RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las fases de caracterización de materiales, así como los resultados mecánicos de las muestras elaboradas.

En los siguientes resultados se reportan los datos correspondientes a caracterización de materiales, ensayos preliminares y ensayos definitivos. Con los ensayos preliminares se determinó el efecto del curado y con los ensayos definitivos se ejecutó el modelo descrito en la sección de diseño experimental.

7.1 CARACTERIZACIÓN DE CENIZAS

La apariencia de las cenizas que son recolectadas en los ciclones es de un material de color gris oscuro y a su vez se observa material inquemado de mayor tamaño. Ver Figura 20. Esta información en secciones posteriores se cuantificaron los contenidos de material inquemado.



Figura 20. Ceniza extraída del multiciclón empresa textil

Según el color de la ceniza se puede evidenciar contaminación por material inquemado que puede explicar resistencias mecánicas inferiores a las alcanzadas con las cenizas de centrales termoeléctricas. Como ejemplo de la diferencia en el color de las cenizas se presenta la Figura 21 en la cual se observa el color de una muestra de cenizas extraídas de la central termoeléctrica Termoguajira ubicada en el norte de Colombia y que utiliza carbón de las minas del Cerrejón, Colombia.



Figura 21. Cenizas volantes central termoelectrica

En la Figura 22 se presenta la curva de distribución granulométrica de las cenizas extraídas en el multiciclón de la empresa textil objeto de la presente investigación. Se denomina ceniza cruda a aquella que se evalúa tal cual sale del sistema de control atmosférico.

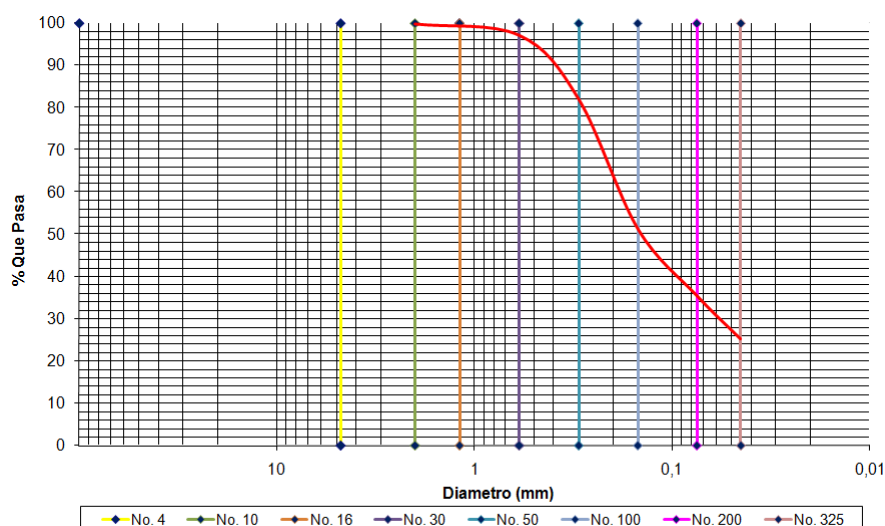


Figura 22. Distribución granulométrica de ceniza cruda

Analizando la curva granulométrica de la Figura 22 se puede determinar que hay aproximadamente un 25% de material con un tamaño inferior a 45 μm y según las características necesarias para la activación el porcentaje de partículas con un tamaño inferior a las 45 μm debe ser mayor al 75% [36].

Según esta premisa se procedió a realizar un tamizado manual en zarandas de malla Tyler número 325 (tamaño 45 μm), teniendo como resultado las características granulométricas descritas en la Tabla 13.

Tabla 13. Características granulométricas ceniza tamizada (tamiz húmedo)

Malla No.	Tamaño partícula μm	% Ceniza que pasa
325	45	90,8
400	37	74,2

El tamizado de las muestras permite evitar fuentes de variación no controladas o medidas, como lo puede ser el material inquemado el cual es proporcional al tamaño de partículas. Adicionalmente este tratamiento permite alcanzar mayor área superficial, lo que supone una mayor reactividad del material

En estudios preliminares, con estudiantes de ingeniería civil de la Universidad de Medellín se realizaron ensayos con cenizas tamizadas, encontrando que las diferencias mecánicas no eran significativas, pero se requieren análisis más exhaustivos para poder realizar dichas aseveraciones que se encuentran por fuera del objetivo de este trabajo de grado por los siguientes efectos ambientales.

El pretratamiento mediante tamizado tiene las siguientes implicaciones:

1. Desde el punto de vista ambiental se está reduciendo el impacto de la implementación de estos resultados. Esto se debe a que solo se estaría aprovechando el 25% del residuo y se estaría dejando fuera del alcance el 75% de la problemática industrial actual
2. Desde el punto de vista del material se está reduciendo el contenido de material inquemado en las muestras y se incrementa la reactividad del material por el aumento del área superficial por gramo de ceniza.

Es por las anteriores razones que para el análisis definitivo de este trabajo de grado se utilizó material crudo (sin pretratamientos por tamizado) con el fin de alcanzar un mayor impacto en la utilización de resultados de la presente investigación.

7.1.1 FLUORESCENCIA DE RAYOS X

La composición química de las muestras se presenta en la Tabla 14. En dicho registro se reportan los óxidos representativos para el proceso de geopolimerización y la química del cemento.

Tabla 14. Composición química muestra de cenizas tamizadas – ensayos preliminares –

Composición Química	(%)
SiO ₂	67,23
Al ₂ O ₃	18,21
Fe ₂ O ₃	4,46
CaO	0,73
MgO	-
Na ₂ O	1,2
K ₂ O	0,02
SO ₃	2,76
Cr ₂ O ₃	-
MnO	-
P ₂ O ₅	0,133
H	-
PPI (110 -1000)°C	2,93

En la Tabla 15 se reporta el resultado del análisis por FRX de las cenizas utilizadas en el presente estudio. Como resultado de ello se reporta el contenido de los óxidos representativos para la activación alcalina de cenizas.

Tabla 15. Composición química de cenizas sin tamizado

Composición Química	(%)
SiO ₂	20,5
Al ₂ O ₃	16,2
Fe ₂ O ₃	4,02
TiO ₂	0,66
CaO	4,04
MgO	2,04
Na ₂ O	6,08
K ₂ O	0,97
P ₂ O ₅	0,03
NiO	0,024
SO ₃	2,63
ZnO	0,049
V ₂ O ₅	0,19
SrO	0,104
CuO	0,04
BaO	0,527
PPI (110 -1000)°C	41,9

Como resultado del análisis de composición química mediante FRX se concluye:

- Entre las dos muestras analizadas se detectaron diferencias en la composición química principalmente en los contenidos de SiO_2 , CaO y Na_2O .
- Es evidente el cambio en el contenido de PPI. Por lo tanto se concluye que el tamizado es efectivo para la remoción de material inquemado. El contenido de material inquemado es excesivamente alto.
- La relación original Si/Al de las cenizas sin tamizar es igual a 1,07
- La relación original S/A de las cenizas sin tamizar es igual a 2,1.

7.1.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Como resultado del proceso de caracterización mineralógica se obtuvieron los difractogramas de la Figura 23 para los estudios realizados en la presente investigación.

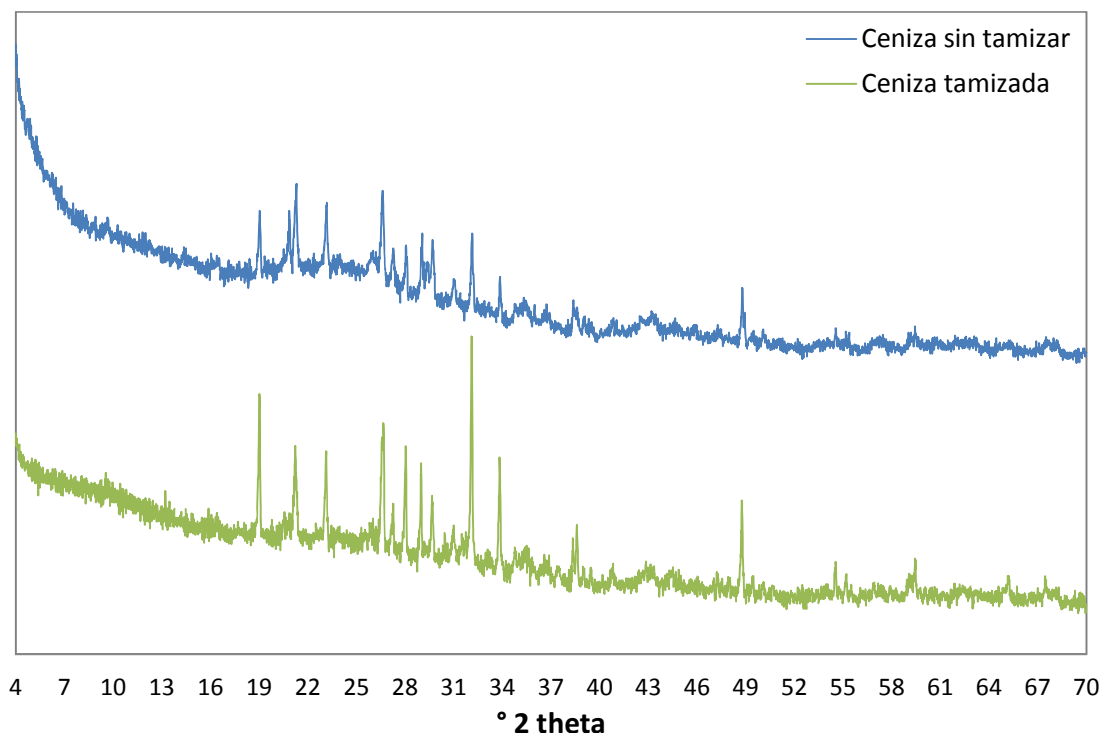


Figura 23. Patrones identificados mediante DRX

En la Figura 23 se reportan dos difractogramas para una muestra de cenizas tamizada y otra sin tamizar. Los ensayos de la presente investigación se realizaron con la ceniza sin tamizar, pero en los ensayos preliminares se utilizó ceniza tamizada por malla 325.

En la Figura 23 se pueden identificar coincidencias de picos, sin embargo se puede observar que las cenizas tamizadas presentan un mayor grado de cristalinidad (mayor número de conteos y picos mejor definidos) que las cenizas sin tamizar.

En la Tabla 16, se presentan los compuestos identificados de acuerdo al difractograma.

Tabla 16. Compuestos identificados DRX – Ceniza tamizada

Código Ref.	Nombre compuesto	Fórmula química	Semi-Cuantificación
01-074-2036	Tenardita	Na ₂ SO ₄	58%
01-079-1906	Cuarzo	SiO ₂	8%
01-076-2469	Nefelina	Na ₃ K (Si _{0.56} Al _{0.44}) ₈ O ₁₆	35%

La semicuantificación reporta un contenido del 58% de sulfato de sodio (tenardita) el cual contribuye para explicar el pH original de la ceniza (determinado como 12 unidades) y al mismo tiempo sirve de argumento en los resultados finales.

En la Figura 24 se reportan los picos del difractograma obtenido para la ceniza tamizada.

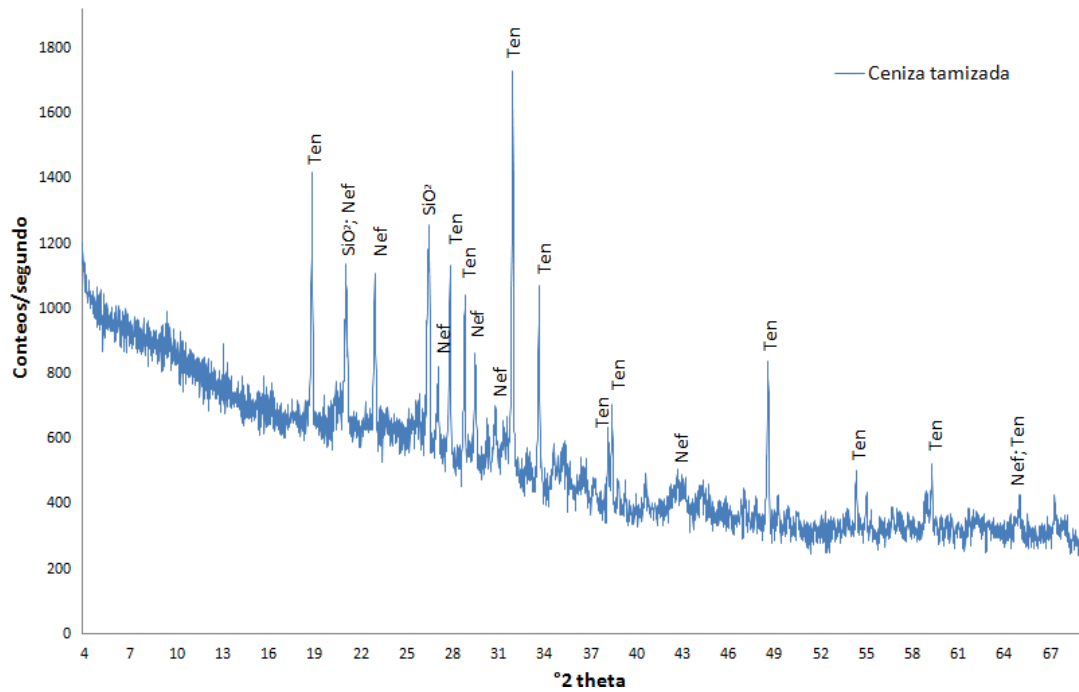


Figura 24. Picos identificados de mayor coincidencia – Ceniza tamizada

En la Figura 24 se observa la presencia de los picos cristalinos. Existen múltiples coincidencias con los picos de las cenizas sin tamizar. La semi-cuantificación arroja los resultados de la Tabla 16.

La Figura 24 puede ser contrastada con la Figura 25, en la cual se presentan los patrones utilizados para el análisis del difractograma de la ceniza tamizada.

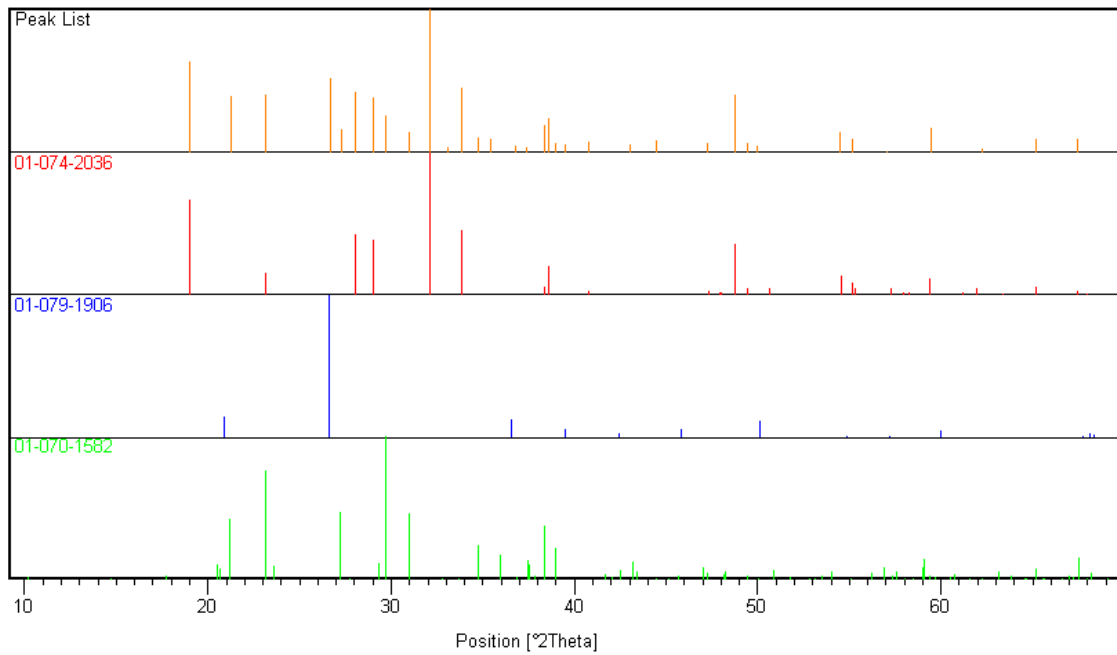


Figura 25. Lista de picos y patrones. Ceniza tamizada.

En la Figura 26 se reportan los picos del difractograma obtenido para la ceniza sin tamizar.

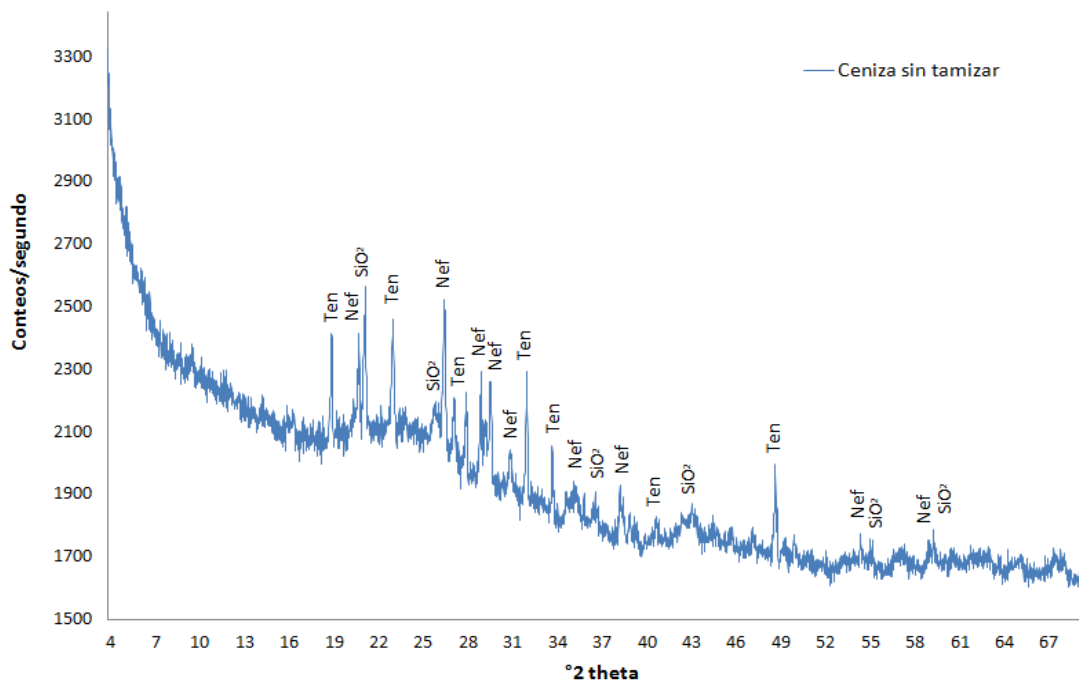


Figura 26. Difractograma y reporte de picos Ceniza sin tamizar

En la Figura 26 se observan varias coincidencias de picos entre la ceniza tamizada y la ceniza sin tamizar. La semi-cuantificación arroja los resultados

de la Tabla 17. Adicionalmente se encuentra evidencia de amorficidad del material debido a la presencia del halo formado entre 17° y 30°.

Tabla 17. Compuestos identificados DRX – Ceniza sin tamizar

Código Ref.	Nombre compuesto	Fórmula química	Semi-Cuantificación
00-005-0631	Tenardita	Na ₂ SO ₄	35%
01-083-0539	Cuarzo	SiO ₂	19%
01-076-2469	Nefelina	Na ₃ K (Si _{0.56} Al _{0.44}) ₈ O ₁₆	46%

En la Figura 27 se reportan los picos y los patrones utilizados para el análisis del difractograma correspondiente a la ceniza sin tamizar.

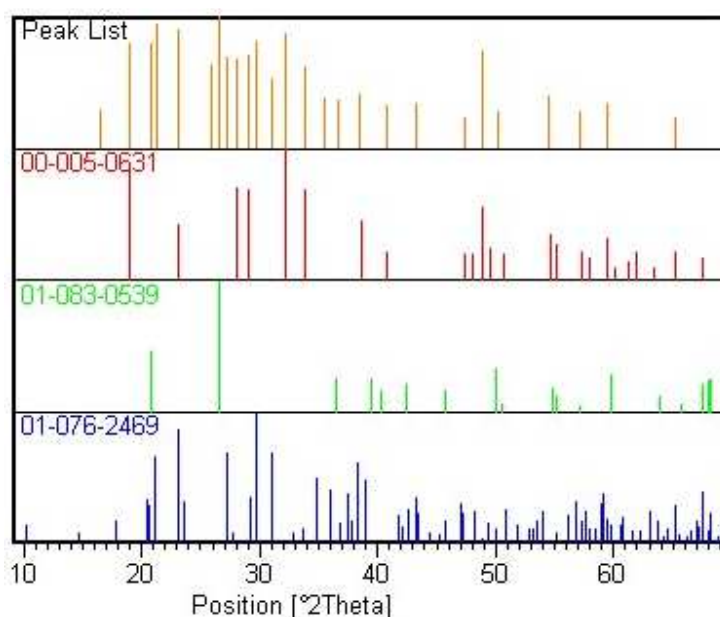


Figura 27. Lista de picos y patrones. Ceniza U de M (2)

La tenardita (Na₂SO₄) puede ser propulsor de eflorescencias y fases expansivas que consecuentemente pueden generar microfisuras y afectar las propiedades mecánicas del material. No obstante se ha encontrado que el efecto del sulfato de sodio es menos significativo para relaciones con altos contenidos de sílice soluble [7].

En cuanto a la alúmina (Al₂O₃) se puede observar que se reportan compuestos cristalinos con Al₂O₃ debidos a la presencia de la nefelina. Por otra parte se confirma la presencia de SiO₂ cristalina que corresponde a la fracción no reactiva de la SiO₂ original reportada mediante FRX.

En la Figura 28 se puede comparar 4 patrones de DRX correspondientes a muestras de cenizas de carbón emitidas por la industria local cuya fuente de abastecimiento de carbón son las minas de los yacimientos de Amagá.

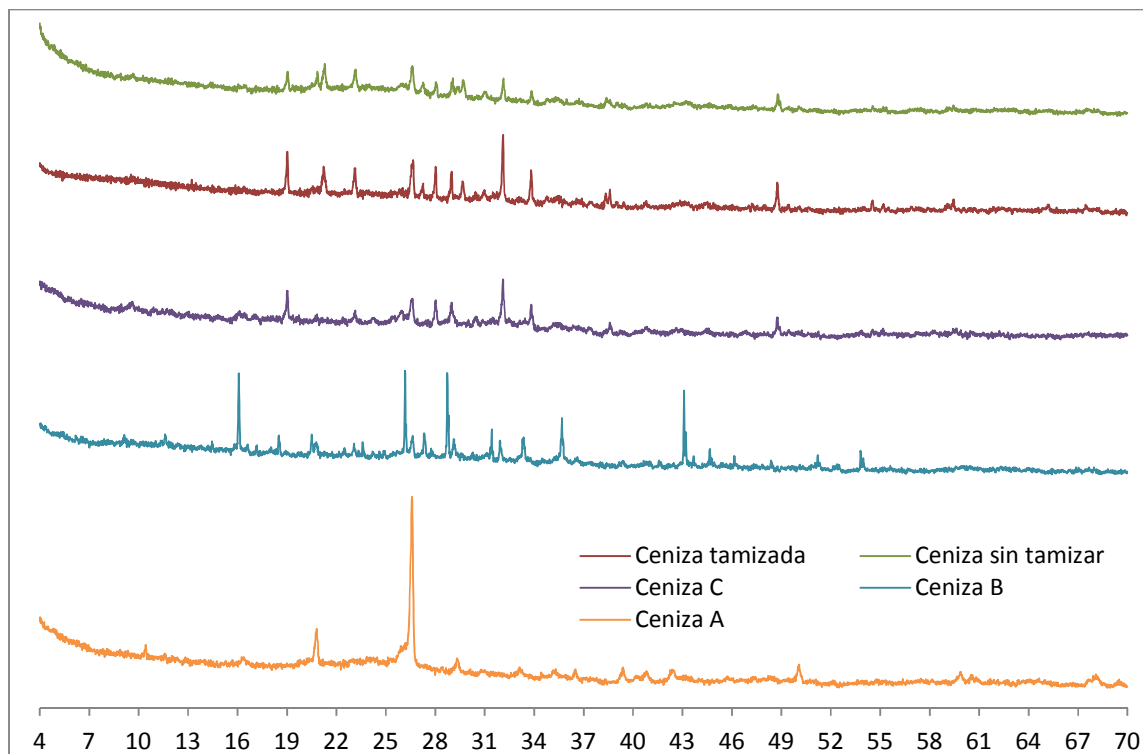


Figura 28. Comparación difractogramas de cenizas locales

Del análisis de los patrones reportados en la Figura 28 se observa que las muestras identificadas como ceniza tamizada, ceniza sin tamizar (utilizada para las muestras de este estudio) y la *Ceniza C* presentan picos en las mismas posiciones con la característica principal de contener tenardita, nefelina y ausencia de mulita.

La *ceniza B* presenta la característica de tener ausencia de tenardita. El sulfato de sodio presenta un pH básico cuando se disuelve en agua y puede influir negativamente en el desarrollo de mayores resistencias mecánicas según los resultados de Criado (2007).

La ceniza A presenta la característica de contener mulita. Dicha fase puede ser de especial interés para el análisis de las cenizas aprovechables para la producción de geopolímeros. Sin embargo dicha aseveración está por fuera del presente estudio y solo se sustenta en ensayos preliminares que no se incluyen en el presente trabajo por ser preliminares para futuras investigaciones. La mulita puede ser formada desde 1400°C por lo que su

presencia supone unas condiciones de quemado especiales que suponen menores cantidades de material inquemado y altas temperaturas de hogar en las calderas.

7.1.3 DETERMINACIÓN DE FASES VÍTREAS POR MEDIOS QUÍMICOS

Por medio de agentes químicos se determinó el contenido de material reactivo perteneciente a SiO_2 presente en la ceniza de estudio. Este procedimiento se realizó con el ingeniero Yhan Paul Arias según la norma europea UNE EN-196-2-06 y la norma UNE 80-225-93, la cual utiliza NaOH y HCl en altas concentraciones para luego llevar la muestra a un horno a 1.100°C con Na_2CO_3 .

El resultado obtenido fue del 65%, por lo tanto según los resultados descritos en la caracterización mediante DRX se puede asegurar que el 35% de SiO_2 presente en las cenizas se encuentra en forma cristalina como cuarzo y el 65% restante se encuentra en fases amorfas o vítreas que constituyen la fase reactiva de SiO_2 presente en la ceniza.

Del análisis de resultados de la caracterización por las tres técnicas: DRX, FRX y medios químicos se concluye que las cenizas de carbón con las cuales se está trabajando tiene limitaciones químicas para la evaluación de módulos de activación alcalina debido a que presenta una relación S/A igual a 2,1.

La relación original S/A de la ceniza de carbón obliga a trabajar por fuera del rango óptimo para la activación alcalina reportado por [13], el cual establece que para la formación de los geopolímeros se deben trabajar módulos S/A que varían entre 3,5 y 4,5.

Según la referencia de la Tabla 6 se concluye que la relación Si/Al se encuentra por fuera del punto óptimo para la producción de cementos o concretos de baja emisión de CO_2 dado que para alcanzar dichos materiales es necesaria una relación de 2,0 unidades y en el material de partida del presente trabajo tiene una relación de 1,07 unidades.

7.1.4 DETERMINACIÓN DE MATERIAL INQUEMADO

Del análisis de las cenizas crudas se encontró un porcentaje de material inquemado del 34%, dicho análisis se realizó en la Universidad de Medellín.



Figura 29. Evaluación del material inquemado



Figura 30. Material posterior al proceso de calcinación

El resultado del ensayo de material inquemado es alto en comparación con los materiales de partida de otros autores en el tema de activación alcalina. En la Tabla 5 se puede observar un compendio con las características de los materiales de partida de diferentes autores.

Según los resultados del análisis de material inquemado en las cenizas de partida de la presente investigación y de la Tabla 5 se concluye que el material presenta deficiencias por excesivo contenido de material inquemado, el cual puede explicar comportamientos mecánicos inferiores a los reportados por diferentes autores alrededor del mundo.

7.2 ENSAYOS PRELIMINARES

7.2.1 CONTROL DE FLUJO

En el modelo estadístico se ha descrito que el flujo del material quedará fijo en 75% para todas las muestras. Dicho parámetro fue determinado con la

metodología descrita en la norma ASTM 1437-01. Como resultado de ello se generaron curvas como las descritas a continuación.

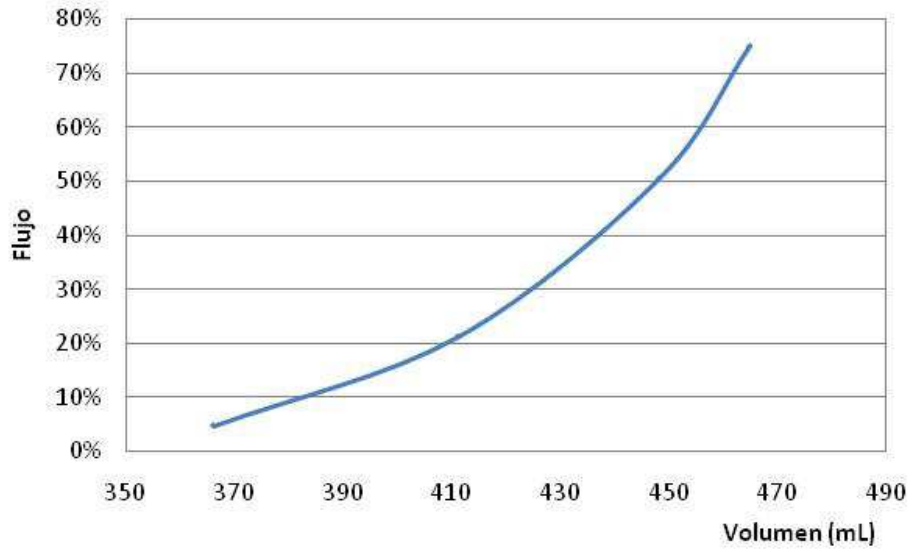


Figura 31. Flujo de la solución N4S0. Relación Arena/Ceniza= 0,5

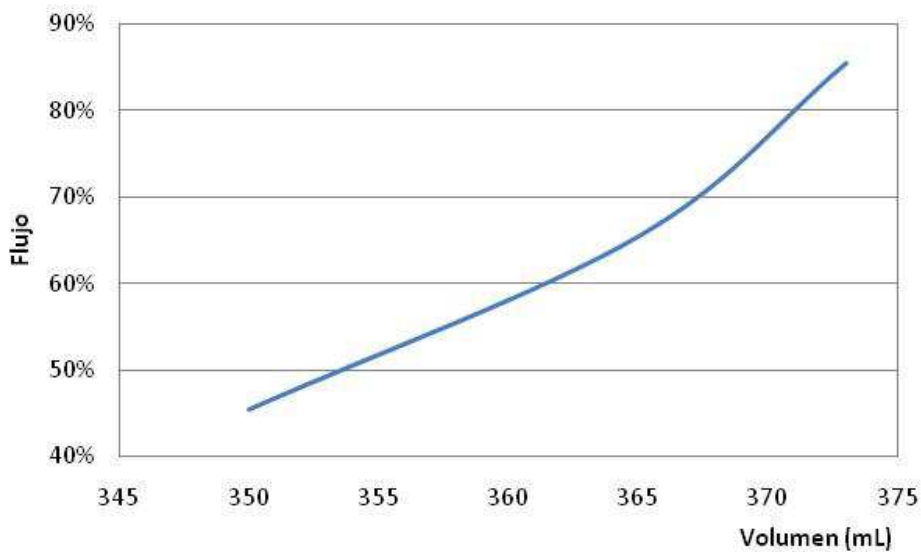


Figura 32. Flujo solución N4S0. Relación Arena/Ceniza= 1,5

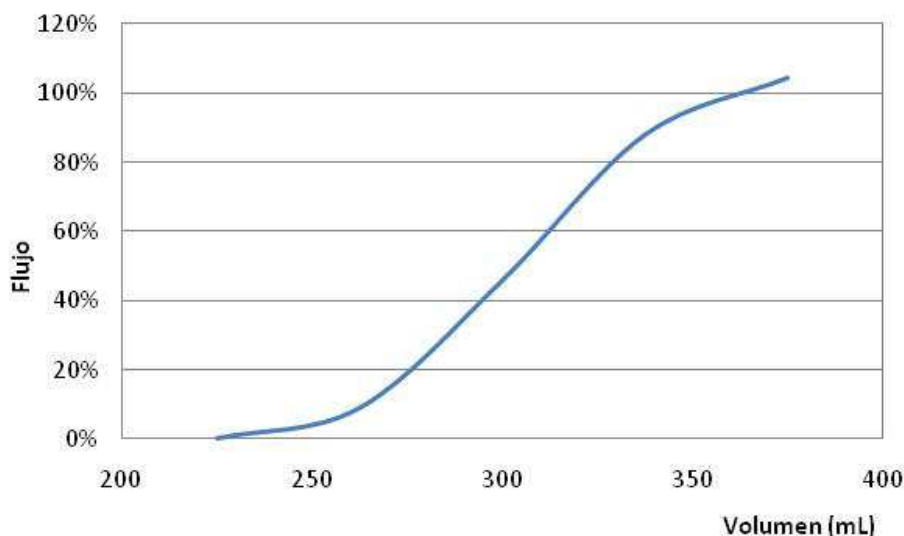


Figura 33. Flujo de la solución N3S75. Relación Arena/Ceniza= 1,0

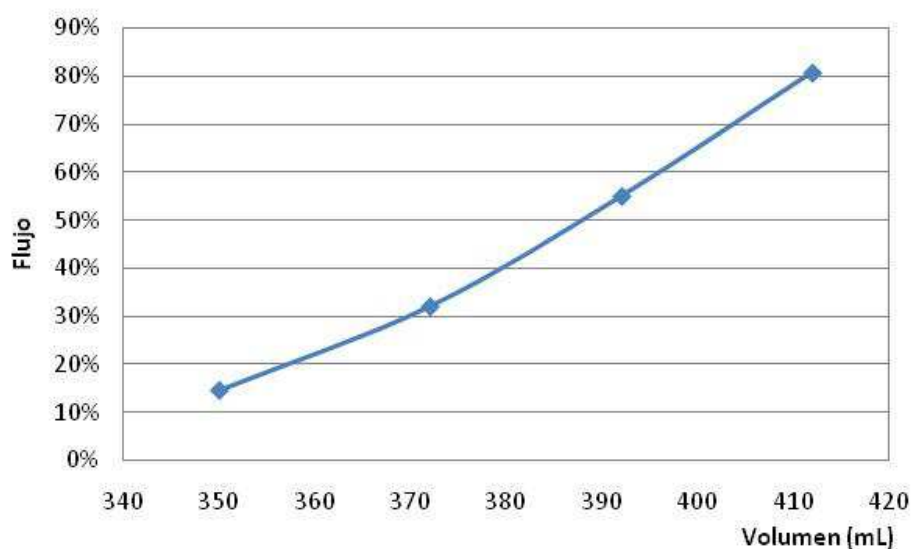


Figura 34. Flujo de la solución N2S0. Relación Arena/Ceniza= 0,5

El control de la fluidez en los ensayos es considerado fundamental en la presente investigación debido a los cambios de densidad de los activadores utilizados y la influencia que tiene la relación ceniza/activador en la resistencia mecánica del material (paralelo al efecto en el cemento agua/cemento).

En la literatura consultada para la presente investigación no se incluye o controla esta variable, sin embargo el control de la misma supone una reducción del efecto de su variación dando lugar a mayor claridad en los

efectos de las variables seleccionadas y sus interacciones sin la influencia de aditivos.

7.2.2 EFECTO DEL TIPO DE CURADO

Mediante ensayos preliminares se evaluó el efecto del tipo de curado en la resistencia mecánica del material. Se consideró importante realizar este ensayo dado que la etapa de curado se preveía como aquella que generaría los mayores impactos ambientales.

El procedimiento consistió en someter muestras con la misma constitución a diferentes ambientes de curado. Los tipos de curado evaluados son los siguientes:

1. Sumergido en agua
2. Cuarto húmedo
3. Desecador
4. Horno a 80°C

Con base en estas opciones se obtiene un total de 12 muestras a ser evaluadas, dado que cada muestra se evalúa tres veces.

Las muestras fueron preparadas según las características descritas en la Tabla 18

Tabla 18. Muestras evaluación tipo de curado

Activador	Relación Ceniza/Arena	Relación Activador/Mortero	Ceniza (g)	Arena (g)	Solución* (g)
N4S0	0,5	0,6	470	235	423
N4S0	0,5	0,6	470	235	423
N4S0	0,5	0,6	470	235	423
N4S0	0,5	0,6	470	235	423

* El flujo en dichos morteros fue medido como igual al 75%

Las muestras se realizaron por triplicado. La captura de los datos se realizó de forma aleatoria. Los resultados de estas corridas se encuentran en la Tabla 19.

Tabla 19. Efecto del curado de las muestras.

Curado	ρ (Ton/m ³)	ρ prom. (Ton/m ³)	f _c (KN)	f _c prom. (KN)
Sumergido	1,11	1,11	5,83	5,93
Sumergido	1,11		6,20	
Sumergido	1,12		5,77	

Curado	ρ (Ton/m ³)	ρ prom. (Ton/m ³)	f_c (KN)	f_c prom. (KN)
Horno 80°C	1,28	1,27	7,82	7,90
Horno 80°C	1,27		8,01	
Horno 80°C	1,26		7,87	
C. Húmedo	1,37	1,40	2,44	2,46
C. Húmedo	1,41		2,48	
C. Húmedo	1,43		2,46	
Desecador	1,29	1,34	4,10	4,07
Desecador	1,32		4,79	
Desecador	1,42		3,33	

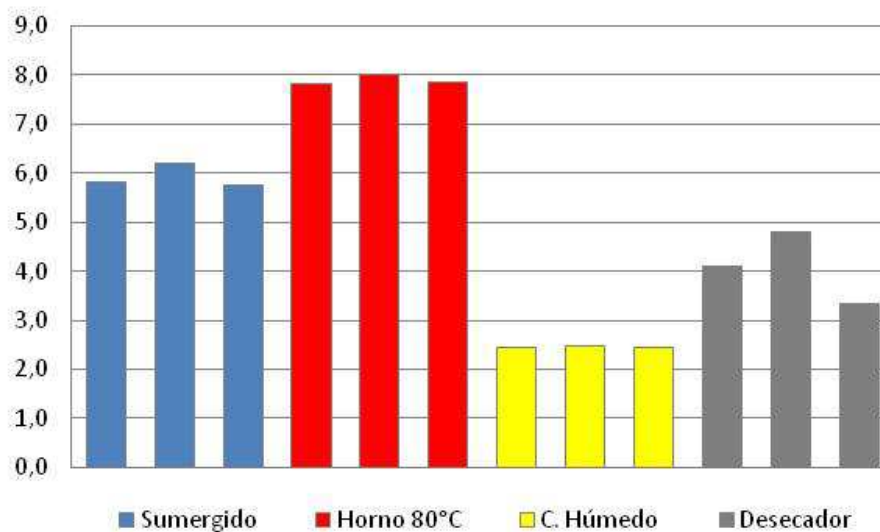


Figura 35. Efecto del curado en la resistencia mecánica (KN)- 7 días de curado

A continuación se presenta el análisis estadístico de los resultados:

Tabla 20. Resumen estadístico ANOVA ensayos tipo de curado (KN)

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Sumergido	3	17,80	5,93	0,0542
Horno 80°C	3	23,70	7,90	0,0097
Cuarto Húmedo	3	7,38	2,46	0,0004
Desecador	3	12,22	4,07	0,5334

Tabla 21. Tabla ANOVA para el tipo de curado, $\alpha = 0,05$

Fuente variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	F	Probabilidad	$f_{0,05,v1,v2}$
Tratamientos	49,67	3	16,56	110,80	7,4373E-07	4,07

Fuente variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	F	Probabilidad	$f_{0,05,v1,v2}$
Error	1,19	8	0,15			
Total	50,87	11				

Como resultado de la ANOVA se puede concluir que el tipo de curado influye estadísticamente en la resistencia mecánica del material. Con base en ello se seleccionó como tratamientos para las muestras el curado sumergido y el curado en horno.

Fue de interés evaluar estos dos niveles del tipo de curado dado que se pretende encontrar un material que impacte menos con el medio ambiente y por lo tanto es de interés evaluar el nivel sumergido en el cual se presenta un menor consumo de energía.

Con base en los resultados obtenidos en los ensayos preliminares, los cuales se encuentran representados en la Figura 35 y el análisis de su correspondiente ANOVA (ver Tabla 21) se puede concluir que tecnológicamente existen las condiciones para replicar los procesos a nivel industrial, sin embargo, la viabilidad económica del material se puede ver afectada por el consumo de energía que implica la utilización de un horno a 80°C. Es por este motivo que el modelo estadístico seleccionado quiso evaluar el efecto de reducir la temperatura de curado en 20°C y evaluar el curado a 60°C.

7.3 ENSAYOS MECÁNICOS - MUESTRAS DEFINITIVAS

A continuación se presentan los resultados del modelo estadístico descrito en la Tabla 12. El cual constituye el trabajo definitivo de la presente investigación. Las muestras fueron elaboradas con los procedimientos descritos en la sección de metodologías.

7.3.1 COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN

En la Figura 36 se pueden observar los resultados de los ensayos experimentales ejecutados en cumplimiento de la Tabla 12.

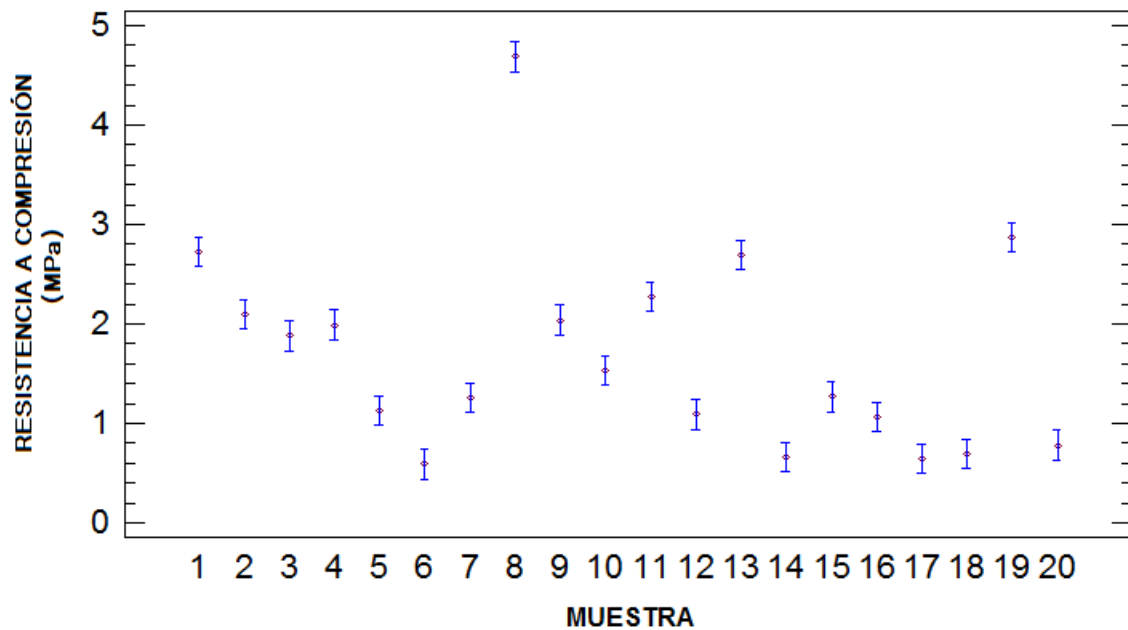


Figura 36. Medias y 95% LSD FISHER

Tabla 22. Tabla de Medias para Resistencia a compresión (28 días) por muestra con intervalos de confianza del 95,0%. Unidades: MPa

Muestra	Casos	Media	Error estándar (agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
1	3	2,7302	0,10343	2,58239	2,87801
2	3	2,09735	0,10343	1,94954	2,24517
3	3	1,87998	0,10343	1,73217	2,0278
4	3	1,99072	0,10343	1,84291	2,13854
5	3	1,12794	0,10343	0,98013	1,27576
6	3	0,589344	0,10343	0,44153	0,737157
7	3	1,2603	0,10343	1,11249	1,40812
8	3	4,68569	0,10343	4,53788	4,8335
9	3	2,03943	0,10343	1,89162	2,18724
10	3	1,53683	0,10343	1,38902	1,68464
11	3	2,26904	0,10343	2,12123	2,41686
12	3	1,0895	0,10343	0,941683	1,23731
13	3	2,6916	0,10343	2,54378	2,83941
14	3	0,660545	0,10343	0,512731	0,808358
15	3	1,26712	0,10343	1,11931	1,41494
16	3	1,0616	0,10343	0,913782	1,20941
17	3	0,64507	0,10343	0,497256	0,792883
18	3	0,689312	0,10343	0,541498	0,837126
19	3	2,87102	0,10343	2,72321	3,01884
20	3	0,780533	0,10343	0,632719	0,928347
Total	60	1,69816			

Como comportamiento general se evidenciaron fallas en forma de cónica, lo que da evidencia de un adecuado comportamiento del material para distribuir las cargas aplicadas y que el material ha sido preparado adecuadamente [75].

Tabla 23. Múltiples Rangos para Resistencia a compresión (28 días) por muestra. 95% Fisher

Muestra	Casos	Media (MPa)	Grupos Homogéneos
6	3	0,589344	X
17	3	0,64507	X
14	3	0,660545	X
18	3	0,689312	X
20	3	0,780533	XX
16	3	1,0616	XX
12	3	1,0895	X
5	3	1,12794	X
7	3	1,2603	XX
15	3	1,26712	XX
10	3	1,53683	X
3	3	1,87998	X
4	3	1,99072	XX
9	3	2,03943	XX
2	3	2,09735	XX
11	3	2,26904	X
13	3	2,6916	X
1	3	2,7302	X
19	3	2,87102	X
8	3	4,68569	X

En la Tabla 23 se resumen los resultados de comparación con el método LSD de Fisher, según el cual de los 190 pares posibles se encontró que 155 pares tuvieron diferencia estadística mínima significativa con un nivel de confianza del 95%. Adicionalmente se encontraron 8 grupos homogéneos, es decir, grupos de muestras que no presentaron diferencias estadísticas significativas

7.4 MODELO ESTADÍSTICO

A continuación se presentan los resultados del modelo estadístico utilizado para el desarrollo del proyecto. Dicho análisis se realizó en el paquete estadístico STATGRAPHICS.

En la Figura 37 se reporta la validación de los supuestos en la ejecución del modelo mediante la gráfica de residuos de la respuesta. Como se puede observar los puntos no presentan un comportamiento simétrico o de algún tipo que evidencie errores en los supuestos de la ANOVA y por lo tanto se puede proceder a analizar los datos.

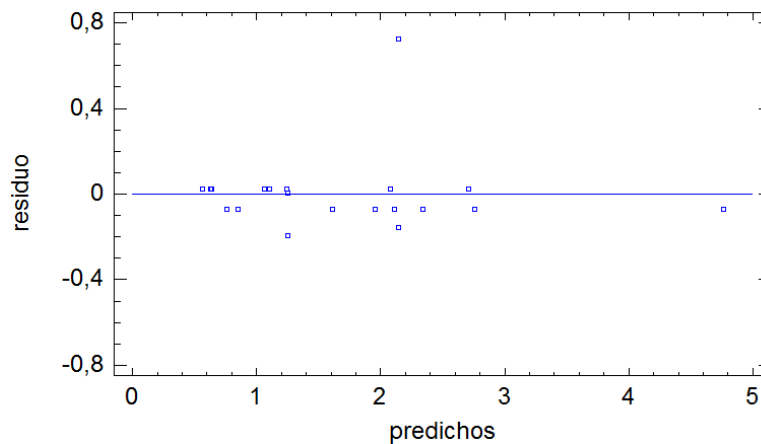


Figura 37. Gráfica de residuos para resistencia a compresión (28 días)

En la Figura 37 también se pueden observar datos que se encuentran por fuera de la media y que se deben tener en cuenta al modelo de la simplificación del modelo estadístico. Dichos puntos como se analizará posteriormente se deben a la variabilidad del modelo y son eliminados al momento de reducir el modelo hasta los efectos significativos.

En la Tabla 24 se encuentra la ANOVA correspondiente al modelo ejecutado, como se puede observar, en dicha tabla se encuentran todas las fuentes de variación principales así como las interacciones correspondientes a dichos efectos.

Tabla 24. Análisis de varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura condensación	0,0484	1	0,0484	0,31	0,6099
B:Relación Arena : Ceniza	7,1824	1	7,1824	45,33	0,0025
C:Concentración NaOH	0,4356	1	0,4356	2,75	0,1726
D:Relación Silicato : NaOH	3,4596	1	3,4596	21,83	0,0095
E:Tipo de curado	3,9605	1	3,9605	25,00	0,0075
AB	0,04	1	0,04	0,25	0,6418
AC	0,1681	1	0,1681	1,06	0,3612
AD	0,5041	1	0,5041	3,18	0,1490
AE	0,6241	1	0,6241	3,94	0,1182
BC	1,44	1	1,44	9,09	0,0394
BD	0,3025	1	0,3025	1,91	0,2392
BE	0,3136	1	0,3136	1,98	0,2322
CD	0,16	1	0,16	1,01	0,3718
CE	0,4356	1	0,4356	2,75	0,1726
DE	0,1521	1	0,1521	0,96	0,3827
Error total	0,63378	4	0,158445		
Total (corr.)	19,8604	19			

Con un nivel de confianza del 95% se puede concluir que existen tres efectos principales significativos (Relación Arena:Ceniza, Relación Silicato:NaOH y el tipo de curado) y una interacción doble significativa (Relación Arena:Ceniza : Concentración NaOH) dado que el valor estadístico P es menor a 0,05. Sin embargo como se discutirá mas adelante no se debe descartar el efecto de la concentración del NaOH debido a que hace parte de una interacción significativa.

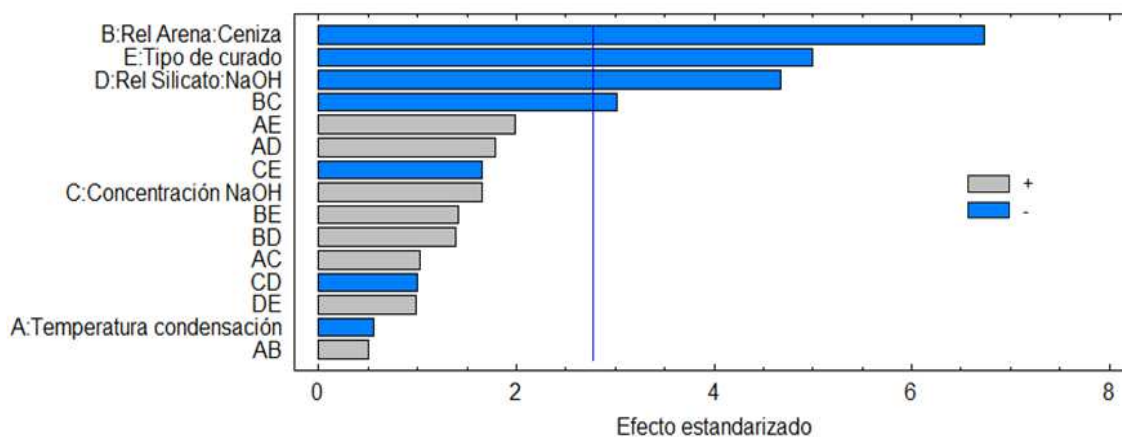


Figura 38. Diagrama de Pareto estandarizado

Según el diagrama de Pareto estandarizado de la Figura 38 se puede concluir que existen cuatro efectos significativos con un nivel de confianza superior al 95% y dichas variables son las mismas que se determinaron con el valor estadístico P.

El modelo estadístico utilizado explica la variabilidad de la resistencia de compresión a 28 días de curado en un 96,81% según el estadístico R-cuadrado. Por otra parte el estadístico R-cuadrado ajustado alcanza un valor de 84,84%. Este último valor es mas adecuado y conservador dado que se trabajo con varios efectos independientes.

Tabla 25. Estadísticos ANOVA

Parámetro	Valor
R-cuadrada	96,809%
R-cuadrada (ajustada por g.l.)	84,842%
Error estándar del est.	0,398
Error absoluto medio	0,092
Estadístico Durbin-Watson	2,29792 (P=0,7059)
Autocorrelación residual de Lag 1	-0,153428

En la Tabla 26 se presentan los efectos estimados para cada una de las variables (efectos) utilizadas y las interacciones involucradas en el modelo

estadístico. Adicionalmente se puede observar que el error estándar promedio en las mediciones es igual a 0,089

Tabla 26. Efectos estimados para la resistencia a compresión (28 días)

Efecto	Estimado	Error Estándar*
Promedio	1,699	0,089007
A: Temperatura condensación	-0,110	0,199026
B: Relación Arena : Ceniza	-1,340	0,199026
C: Concentración NaOH	0,330	0,199026
D: Relación Silicato : NaOH	-0,930	0,199026
E: Tipo de curado	-0,890	0,178014
AB	0,100	0,199026
AC	0,205	0,199026
AD	0,355	0,199026
AE	0,395	0,199026
BC	-0,600	0,199026
BD	0,275	0,199026
BE	0,280	0,199026
CD	-0,200	0,199026
CE	-0,330	0,199026
DE	0,195	0,199026

* Errores estándar basados en el error total con 4 grados de libertad

Para los efectos principales (A, B, C, D, E) se encontraron los comportamientos presentados en la Figura 39 tomando como respuesta la resistencia a compresión a 28 días de curado. A partir de dicha gráfica y la Tabla 24 se pueden analizar los siguientes comportamientos:

- La temperatura de condensación es considerado un aspecto indispensable para la fabricación de geopolímeros bajo las condiciones actuales, sin embargo su efecto fue menor en comparación con las variables que presentaron mayor significancia para los niveles evaluados. El máximo relativo reportado en todas las muestras del modelo se presentó para una temperatura de 60°C. Dicho comportamiento puede ser contradictorio sin embargo se puede explicar debido a que el efecto de las demás variables y sus interacciones tuvieron un efecto mayor al efecto de la temperatura de condensación.
- La relación Arena:Ceniza tiene un efecto significativo en la resistencia a compresión y dicha respuesta se maximiza a bajas relaciones Arena:Ceniza, es decir, a mayores proporciones de ceniza en las mezclas de morteros.

- La concentración de NaOH tiene efecto sobre la resistencia a compresión de las muestras debido a la interacción entre el hidróxido de sodio y la ceniza presente en el mortero. Sin embargo su efecto como variable principal es menor a las variables principales que se ubican por encima en el gráfico de Pareto estandarizado (Figura 38).
- El efecto de la adición de silicatos a los activadores fue negativo en la resistencia a compresión de los morteros a 28 días de curado. Dicho resultado es congruente con los resultados observados en el estado del arte y el análisis de caracterización de las cenizas crudas dado que la adición de sílice activa al sistema indujo un incremento del módulo S/A que genera bajas resistencias mecánicas en los productos geopoliméricos.
- El tipo de curado tiene un efecto significativo en los resultados del modelo y se concluye que para los niveles evaluados el curado en Horno maximiza la respuesta de la resistencia a compresión de morteros a 28 días.

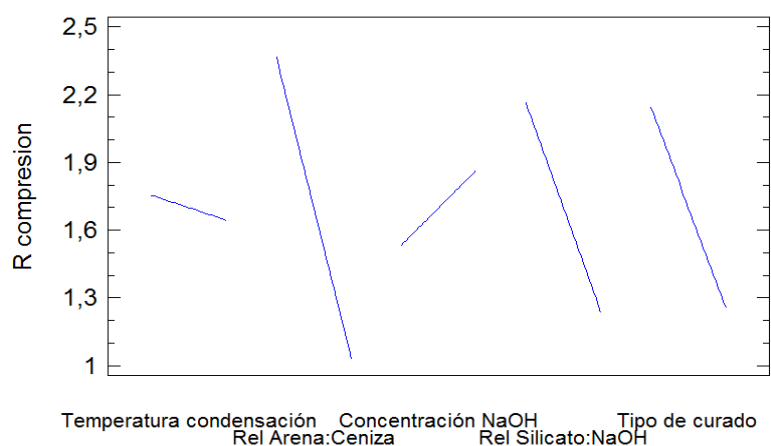


Figura 39. Gráfica de efectos principales para resistencia a compresión (28 días)

En la Tabla 27 se encuentran los coeficientes de la ecuación que describen el fenómeno según las variables utilizadas (ajuste del 84,8%). Dichos coeficientes son preliminares dado que posteriormente se realizará una optimización del modelo mediante la eliminación de variables no significativas. Se debe tener en cuenta que el tipo de curado es una variable cualitativa (categórica) por lo tanto se debe utilizar -1 para el nivel bajo (sumergido) ó +1 para el nivel alto (horno)

Tabla 27. Coeficientes de regresión para resistencia a compresión

Coeficiente	Estimado
Constante	5,664

Coefficiente	Estimado
A: Temperatura condensación	-0,064
B: Relación Arena:Ceniza	-0,515
C: Concentración NaOH	0,01475
D: Relación Silicato:NaOH	-22,4333
E: Tipo de curado	-1,71
AB	0,01
AC	0,001025
AD	0,236667
AE	0,01975
BC	-0,06
BD	3,66667
BE	0,28
CD	-0,133333
CE	-0,0165
DE	1,3

En la Figura 40 se pueden analizar las interacciones dobles posibles en el modelo como se puede observar dicha gráfica es congruente con la ANOVA presentada en la Tabla 24 dado que demuestra la interacción existente entre la relación Arena Ceniza y la concentración del NaOH.

Dicha interacción nos está brindando la información necesaria para concluir de forma preliminar que efectivamente se está presentando una interacción (BC) entre las fases reactivas del material y el activador alcalino utilizado en la reacción y de forma parcial se puede predecir que el efecto de la resistencia a la compresión se debe a las fases N-A-S-H formadas y no únicamente a los efectos de catálisis del NaOH.

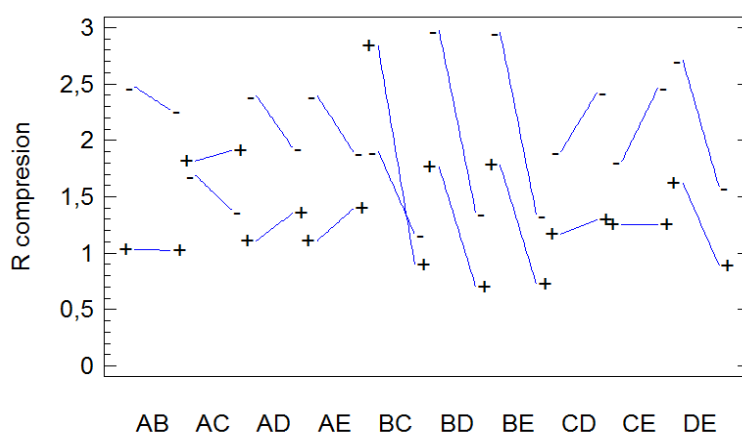


Figura 40. Gráfica de interacciones para resistencia de compresión

Según la interacción detectada en la Figura 40 se procede a analizar dicha interacción obteniendo la respuesta de la Figura 41. La interacción evaluada corresponde a la existente entre la concentración de NaOH y la Relación Arena:Ceniza, como conclusión de esta información se extrae que para ambas

concentraciones existe un efecto sobre la resistencia de compresión, y para la concentración mas alta (40% P/P) el efecto del cambio de nivel de la relación Arena:Ceniza efecto es aún mas significativo, maximizando la respuesta con concentración alta y relación Arena:Ceniza igualmente baja.

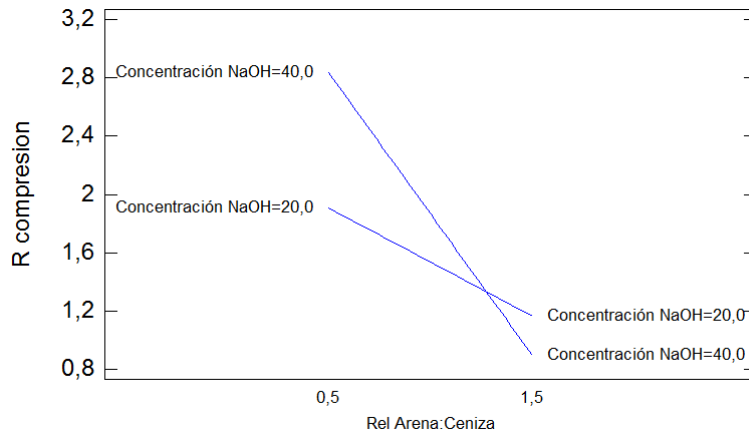


Figura 41. Gráfica de interacción BC para resistencia a compresión (28 días)

En la Figura 42 se puede observar la variabilidad observada en los puntos al centro para el tipo de curado en horno a 60°C. Como se puede observar el máximo de la región observada se encuentra para una temperatura de condensación de 60°C y un relación de Arena:Ceniza igual a 0,5. La Figura 42 solo representa el resultado para dos muestras al centro y no el total de la región experimental (20 muestras), es por esto que el máximo encontrado es relativo.

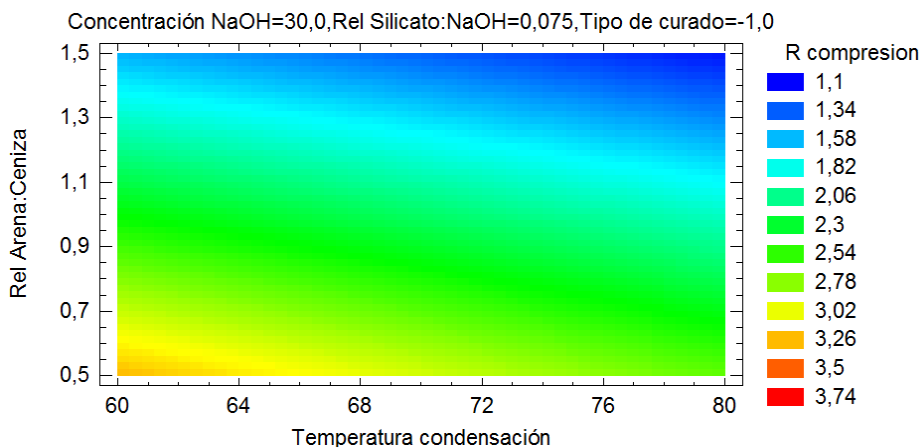


Figura 42. Contornos de la superficie de respuesta estimada (puntos al centro) (MPa)

En la Figura 43 se puede localizar el máximo relativo al modelo experimental utilizado. Dicho punto corresponde a la muestra preparada con las condiciones especificadas en la Tabla 28.

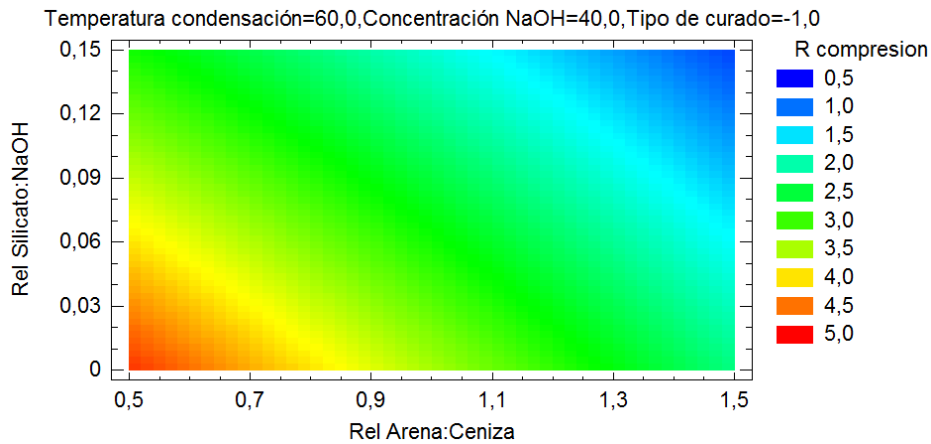


Figura 43. Contornos de la superficie estimada (máximo relativo) (MPa)

Tabla 28. Óptimo experimental

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura condensación -°C	60,0	80,0	60,0
Relación Arena:Ceniza	0,5	1,5	0,5
Concentración NaOH - %(P/P)	20,0	40,0	40,0
Relación Silicato:NaOH	0,0	0,15	0,0
Tipo de curado	Horno	Sumergido	Horno

7.4.1 SIMPLIFICACIÓN DEL MODELO

A continuación se realiza la exclusión de efectos no significativos. Las reglas que se siguen son las siguientes:

1. Excluir interacciones no significativas de dos factores.
2. Excluir efectos principales no significativos que no están envueltos en interacciones significativas.

Como resultado de dicho modelo se excluyen los siguientes efectos

Tabla 29. Efectos excluidos en simplificación del modelo

Efecto
A: Temperatura condensación
C: Concentración NaOH
AB
AC
AD
AE
BD
BE
CD
CE
DE

Como resultado de la simplificación se obtienen los siguientes resultados:

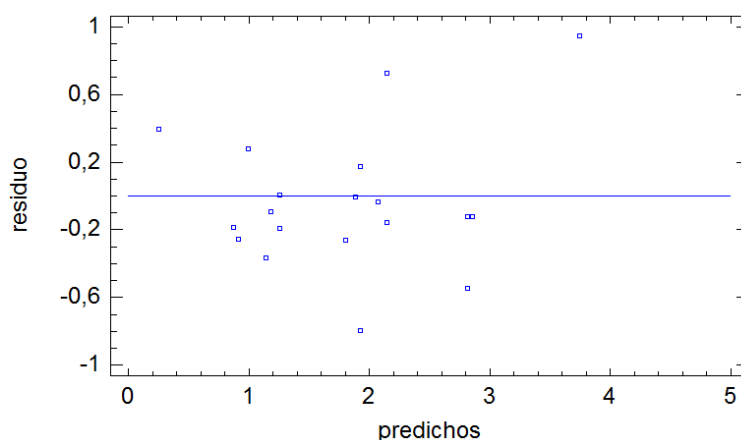


Figura 44. Gráfica de residuos para resistencia a compresión (28 días-simplificada)

Comparando la Figura 37 y la Figura 44 se puede observar que los puntos presentan una distribución mas simétrica mediante la simplificación del modelo y que la nueva gráfica de residuos continua siendo válida para la utilización de la ANOVA dado que no presenta patrones que lo contradigan. Por lo tanto la Tabla 30 presenta la ANOVA definitiva para la corrida experimental ejecutada, la cual servirá para realizar los análisis correspondientes y la elaboración de la regresión que explique el modelo bajo las circunstancias de ejecución de los ensayos.

Tabla 30. ANOVA Simplificada

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
B:Rel Arena:Ceniza	7,1824	1	7,1824	29,73	0,0001
C:Concentración NaOH	0,4356	1	0,4356	1,80	0,2007
D:Rel Silicato:NaOH	3,4596	1	3,4596	14,32	0,0020
E:Tipo de curado	3,9605	1	3,9605	16,39	0,0012
BC	1,44	1	1,44	5,96	0,0285
Error total	3,38228	14	0,241591		
Total (corr.)	19,8604	19			

Como se observa en la Tabla 30 todos los efectos involucrados tienen una significancia estadística apropiada, excepto la concentración del NaOH, sin embargo, dicho efecto no puede ser eliminado debido a que hace parte de la interacción doble significativa

Tabla 31. Estadísticos ANOVA Simplificada

Parámetro	Valor
-----------	-------

Parámetro	Valor
R-cuadrada	82,9697%
R-cuadrada (ajustada por g.l.)	76,8875%
Error estándar del est.	0,49152
Error absoluto medio	0,3132
Estadístico Durbin-Watson	2,44586 (P=0,8170)
Autocorrelación residual de Lag 1	-0,244792

En la Figura 45 se presenta el diagrama de Pareto Estandarizado para los efectos que se consideran significativos en el modelo estadístico resumido mediante la ANOVA.

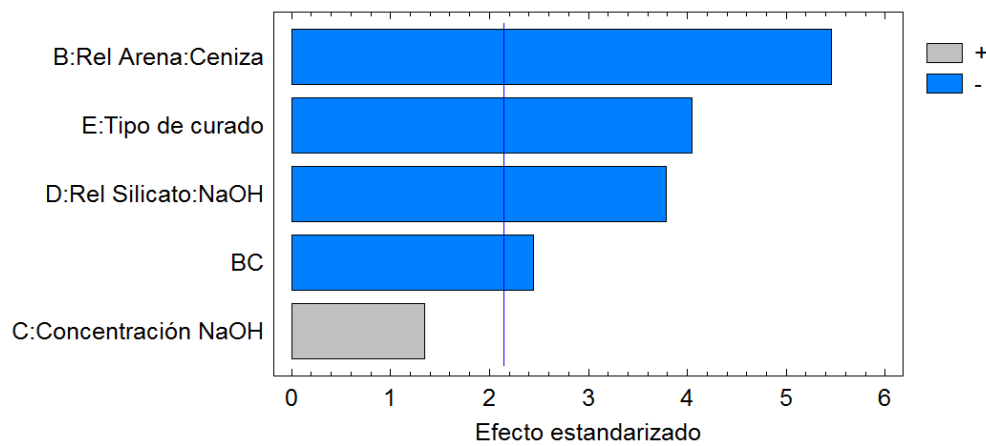


Figura 45. Diagrama de Pareto Estandarizado (Simplificado)

Finalmente se obtienen los coeficientes de regresión para las variables e interacciones significativas. Dichos valores se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32. Coeficientes de regresión (modelo simplificado)

Coefficiente	Estimado
constante	1,209
B:Rel Arena:Ceniza	0,46
C:Concentración NaOH	0,0765
D:Rel Silicato:NaOH	-6,2
E:Tipo de curado	-0,445
BC	-0,06

La ecuación presentada a continuación es válida únicamente para el material obtenido durante los ensayos de la presente investigación y su objetivo de publicación no es la de concluir sobre el fenómeno de geopolimerización. Cada constante está relacionada con la Tabla 32.

$$\text{Resistencia a compresión (28 días)} = 1,209 + 0,46*B + 0,0765*C - 6,2*D - 0,445*E - 0,06*B*C$$

La ecuación que se presentó anteriormente también puede ser utilizada como una herramienta que ayude a entender el fenómeno estudiado, es decir, el modelo allí representado explica la variación de la resistencia a compresión en función de las variables seleccionadas, y a su vez indica cuales variables e interacciones tienen mayor influencia en el modelo. Dicha explicación del modelo y la influencia de cada una de las variables y/o interacciones en el modelo se pueden interpretar de los coeficientes de la anterior ecuación y de la Figura 45.

Los valores de las variables se encuentran especificados en sus unidades originales, excepto para el tipo de curado que toman valores de -1 para el nivel bajo y $+1$ para el nivel alto.

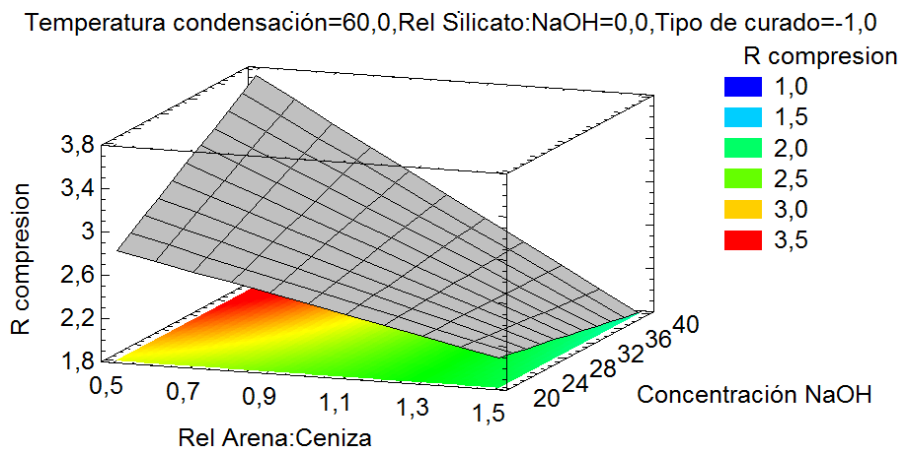


Figura 46. Superficie de respuesta estimada (modelo simplificado) (MPa)

En la Figura 47 se gráfica el contorno de superficie para el modelo simplificado encontrando los máximos en la misma región de la Figura 43.

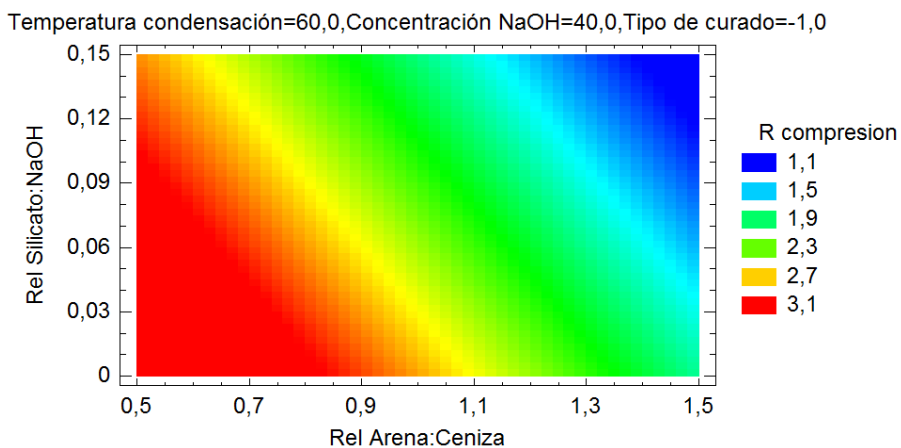


Figura 47. Contornos de superficie para la respuesta estimada (modelo simplificado) (MPa)

coincidencia del pico del 100% para el cuarzo (01-079-1906) y múltiples picos de la zeolita formada (01-075-2318)

Resulta interesante el reporte de SiO_2 (código 00-034-0717, ver anexo), el cual aparece en la base de datos como un *material hecho en condiciones hidrotermales a partir de geles de sílice a temperaturas de 150 a 280°C en presencia de KOH y NaOH* dicha característica corresponde a evidencia de una activación alcalina que se ha desarrollado en el material compuesto.

En la Figura 49 se puede observar los cambios en el difractograma de una muestra de ceniza antes de activación y después de la activación. En dicha figura se puede observar el cambio mineralógico surtido después del proceso de activación alcalina.

Según se puede observar en la Figura 48 se evidencian cambios mineralógicos mediante la aparición de nuevos picos. Se concluye que el material obtenido claramente corresponde a un Aluminio Silicato de Sodio Hidratado.

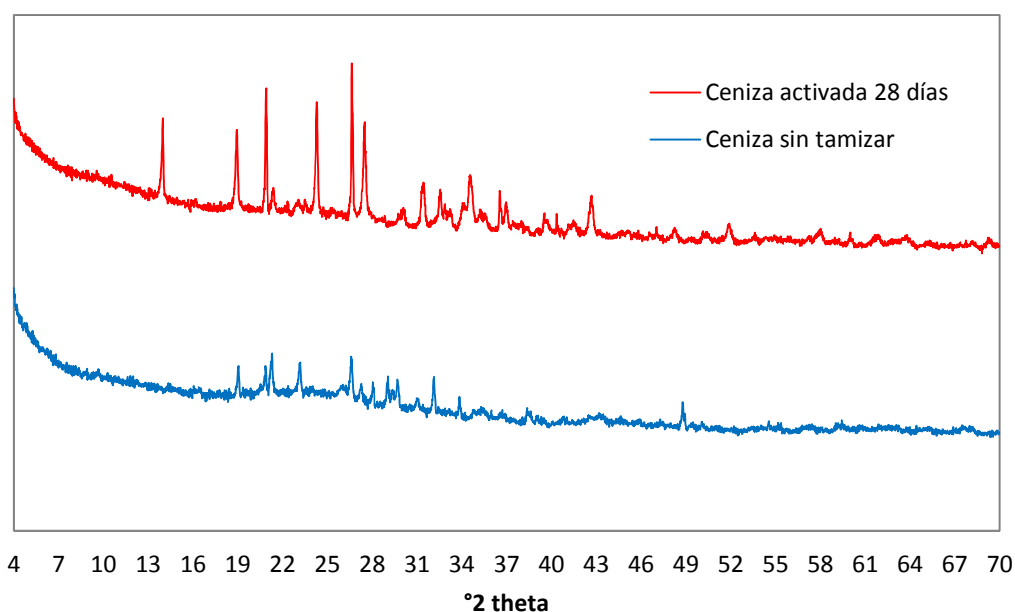


Figura 49. Efecto de la activación alcalina en la mineralogía. 28 días.

Como se puede observar en la Figura 49 se evidencia un cambio en la región que se había identificado previamente como amorfa ($17^\circ - 30^\circ$) y de interés para el proceso de activación alcalina.

7.6 APROXIMACIÓN DEL CICLO DE VIDA

Para el desarrollo de esta metodología se utiliza la norma ISO 14040: Administración Ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Principios y estructuras.

7.6.1 OBJETO Y ALCANCE DE ESTUDIO

El objeto del presente estudio es evaluar el desempeño ambiental de morteros elaborados mediante la activación alcalina de cenizas y compararlos con el desempeño de morteros elaborados con cemento Portland ordinario.

El alcance abarca los siguientes ítems:

- **Funciones:** La producción de ceniza activada.
- **Unidad funcional:** Kilogramos de CO₂ por cada tonelada de ceniza activada.
- **Flujo de referencia:** la producción de 2,5 toneladas de material activado.
- **Sistema:** El proceso necesario para la producción de cenizas activadas alcalinamente desde la recolección de la ceniza, la adquisición de las materias primas y la activación alcalina hasta tener un producto curado y endurecido.
- **Límites del sistema:** El transporte de materias primas y cenizas hasta la obtención de un producto curado y endurecido.
- **Asignación:** la asignación de los flujos de entrada y salida cuantificados en el presente estudio se describen en la Figura 50. Para la asignación se involucraron los aspectos que pueden generar emisiones asociadas. Por ejemplo el transporte de materias primas que nos son producidas a nivel nacional (NaOH comercial).
- **Tipos de impacto:** el estudio se centrará en el calentamiento global, por ello se cuantifican las emisiones asociadas a la producción de un kilogramo de ceniza activada y no pretende determinar todos los impactos y/o aspectos ambientales asociados del sistema de producto.
- **Limitaciones:** El sistema de producto no es un sistema que se encuentre en funcionamiento, por lo tanto algunas variables como el consumo

energético en las etapas de curado requieren supuestos basados en capacidades y formas de operación de otras industrias.

- **Supuestos:**

- El factor de emisión en Colombia según la Unidad de Planeación Minero energética es de 0,3531 KgCO₂/KWh [76]

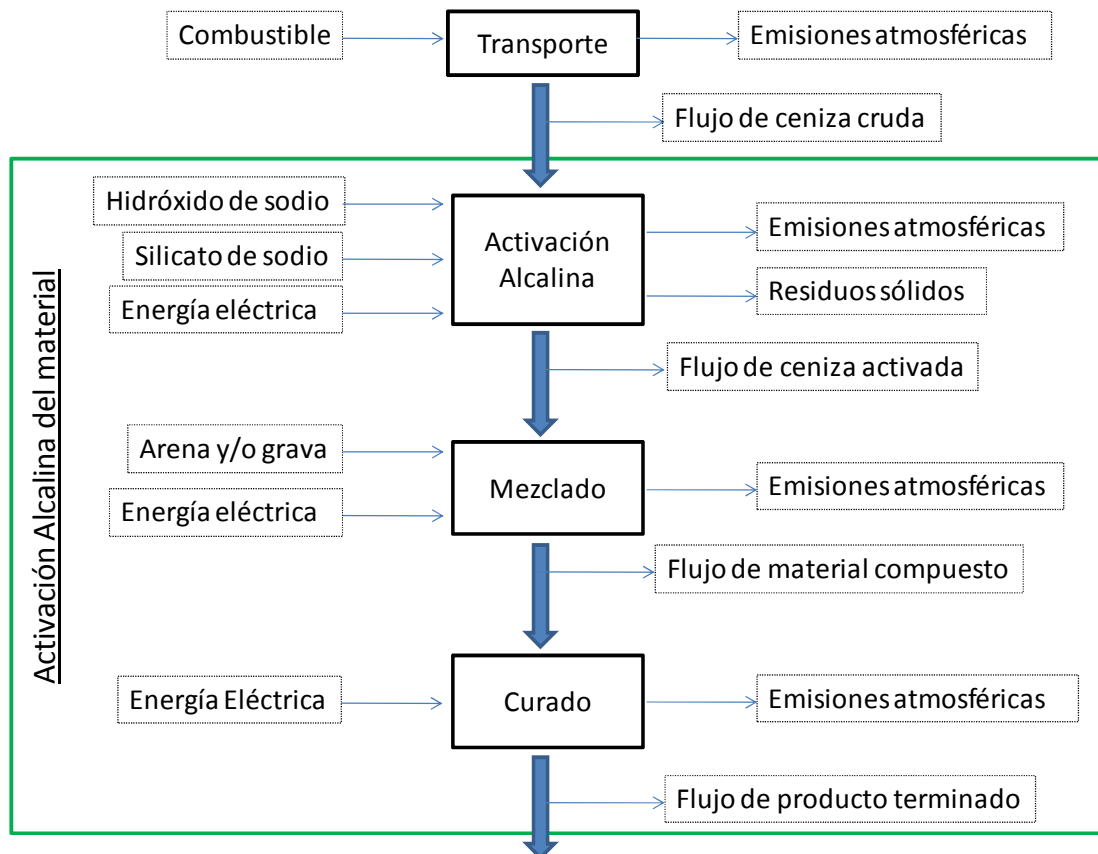


Figura 50. Flujos de materia y energía en el sistema de producto

7.6.2 ANÁLISIS DE INVENTARIO

A continuación se presentan la información a partir de la cual se calculan las emisiones asociadas al material geopolimérico. Ello implica analizar las materias primas y la energía empleada durante el mezclado y el curado de las muestras. Se toma como referencia la muestra con el tratamiento T6A5N4S0H.

MODELO DE ENERGÍA

El modelo de energía utilizado es el reportado por la Unidad de Planeación Minero energética de Colombia, la cual publica los indicadores de ambientales

de la red eléctrica nacional. En lo pertinente a las emisiones asociadas a la producción de energía se reportan los factores de emisión de la Tabla 34.

Tabla 34. Factores de emisión red eléctrica nacional

Parámetro	Energía Eléctrica (g/KWh)
CO ₂	259,0
CO	0,0366
NO _x	0,525
SO _x	0,287

Con base en la Tabla 34 se calculan las emisiones asociadas al consumo eléctrico de los procesos de mezclado y curado durante la activación de las cenizas.

ACTIVACIÓN ALCALINA

Para la activación alcalina se deben considerar los aspectos ambientales del silicato de sodio y del hidróxido de sodio.

HIDRÓXIDO DE SODIO

El hidróxido de sodio consumido en Colombia es producido en Polonia, Perú y la Republica Popular China. Para efectos de los presentes cálculos se asumen promedios de la industria europea. Los datos son recolectados por [77] y fueron publicados en el año 2005 a solicitud de la Asociación de Manufactureros de Plásticos de Europa, *PlasticsEurope*.

Los datos reportados en la Tabla 35 asumen la producción de la soda mediante celdas electrolíticas sabiendo que para la producción de 1 Kg de cloro por esta técnica se deben alimentar a la celda 1,648 Kg de sal en rocas (NaCl). De los cuales 1,000 Kg corresponde al ion cloruro, Cl⁻ del cual se produce el cloro y 0,648 Kg es sodio (Na⁺), del cual se produce el hidróxido de sodio, NaOH. Con base en esto se realizan los balances de masa y energía para la asignación de aspectos ambientales [77].

Los anteriores datos corresponden a la producción de hidróxido de sodio por el método de electrolisis de salmueras, el cual consiste en hacer pasar una corriente por una solución salina. Esta técnica es utilizada para producir cerca del 90% del cloro utilizado industrialmente y como producto alterno se produce la soda cáustica [77].

La electrólisis consiste en sumergir dos electrodos en una solución salina y conectarlos a una fuente de corriente DC. Cuando la corriente pasa a través

de los electrodos se libera gas de cloro desde el ánodo y el gas de hidrógeno es liberado desde el cátodo. De esta forma el electrolito (salmuera) va pasando desde cloruro de sodio hacia hidróxido de sodio según la reacción:



Como se puede observar todos los productos de esta reacción tienen mercados y es por ello que las soluciones de NaCl deben ser lo más puro posible y las asignaciones de los aspectos ambientales se basan en particiones por medio de balances de masa [77].

Tabla 35. Emisión de CO₂ equivalente en la producción de 1 Kg de Hidróxido de sodio [77]

Años equiv.	Origen						Totales (g)
	Produc. Comb*. (g)	Uso Comb*. (g)	Transporte (g)	Proceso (g)	Biomasa (g)	Fugitivas (g)	
20	1200	700	3,9	4,6	-5,8	<0,001	1900
100	710	690	3,9	2,1	-5,8	<0,001	1400
500	530	680	3,9	1,0	-5,8	<0,001	1200

* Combustible

Para el cálculo de las emisiones de CO₂ equivalente se utiliza los potenciales de calentamiento global, GWP por sus siglas en inglés, disponibles en el panel intergubernamental de las Naciones Unidas sobre cambio climático [78].

Tabla 36. Potenciales de calentamiento global de interés

Emisión	GWP (Horizonte)		
	20	100	500
Dióxido de carbono	1	1	1
Metano	56	21	6,5
Dióxido de nitrógeno	280	310	170

MEZCLADO

Para la simulación del proceso se selecciona una mezcladora de concreto tipo cacerola como la que se reporta en la Figura 51.



Figura 51. Mezcladora de concreto tipo cacerola (Yongkang Goldstone Industry & Trade Co)

Las características de la mezcladora se resumen en la Tabla 37

Tabla 37. Especificaciones técnicas mezcladora de concreto

Especificación	
Capacidad del tambor	120L
Diámetro del tambor	68.5 cm
Capacidad de salida	60L 175 libras
Velocidad de la paleta	32 rpm
Motor eléctrico	1600 Watt 2.2HP
Voltaje aceptable	220V-240V/60HZ
Tamaño de la rueda	12 pulgadas

El procesamiento de 2,5 toneladas con base en las especificaciones de la Tabla 37 representaría un consumo eléctrico por efecto del mezclado del material según se resume en la Tabla 38

Tabla 38. Proceso de mezclado

Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo de mezclado	6,00	min
Rendimiento de la máquina	0,06	ton/ciclo
Duración del ciclo	0,10	horas/ciclo
Rendimiento	0,64	ton/h
Tiempo 2,5 ton	3,94	horas
Potencia	1.600,00	W
Consumo	6,30	KWh/2,5 ton
	0,00252	KWh/Kg

CURADO

El curado se realizó en un horno eléctrico industrial (ver Figura 52) con las características presentadas en la Tabla 39

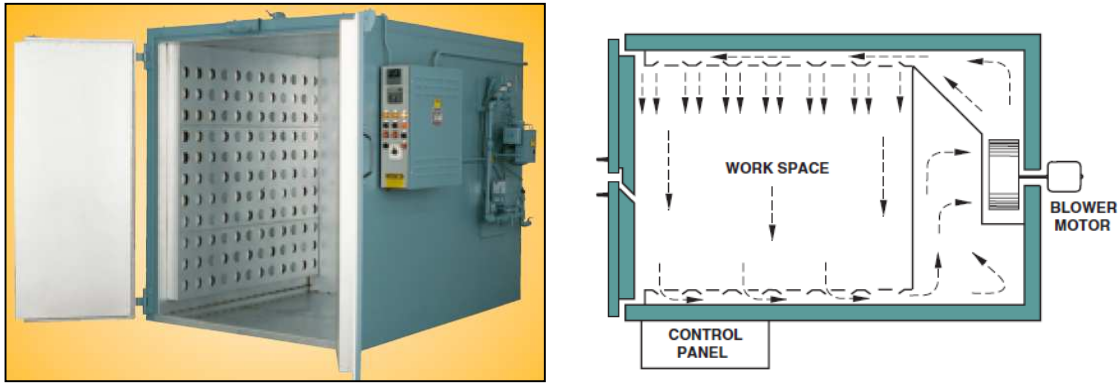


Figura 52. Horno de curado propuesto

El horno se puede adquirir en dos presentaciones, eléctrico o a gas natural, sin embargo se decide utilizar el horno eléctrico para la ejecución del presente modelo.

Tabla 39. Especificaciones técnicas horno de curado

Especificación	
Volumen	270 L
Temperatura máx.	500°F (260°C)
Potencia	1 KW
Precisión	+/- 0,3%
Tiempo de calentamiento	40 min

El procesamiento de 2,5 toneladas con base en las especificaciones de la Tabla 39 representaría un consumo eléctrico por efecto del mezclado del material según se resume en la Tabla 40

Tabla 40. Proceso de curado

Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo de curado	96,00	hora/ciclo
Rendimiento	0,30	ton/ciclo
Tiempo de curado 2,5 ton	800,00	hora
Potencia	1,00	KW
Consumo	800,00	KWh/2,5 ton
	0,32	KWh/Kg

Para la evaluación de las emisiones asociadas se utilizó el factor de emisión asociado a la energía eléctrica en Colombia es igual a 0,3531 KgCO₂/KWh [62].

7.6.3 IMPACTOS AMBIENTALES ASOCIADOS

El proceso productivo tiene varios impactos asociados, sin embargo, el objetivo del presente estudio es valor su efecto en el calentamiento global. Los resultados que se presentan a continuación solo tienen relevancia para las condiciones experimentales y el tipo de material que se obtuvo en esta investigación, se hace esta salvedad debido a que otros materiales de partida pueden presentar diferentes comportamientos gracias a sus mejores desempeños y evoluciones durante el fraguado.

Según los resultados obtenidos en la fase experimental (Figura 36), el mejor producto se alcanza utilizando una concentración del 40% (P/P) de hidróxido de sodio y sin adición de silicato de sodio.

Tabla 41. Características del Activador

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Concentración	40,0	% P/P
Activador	5000,0	Kg/2,5 ton
Soda	0,2	Kg/Kg

Los resultados que se reportan en la Tabla 42 se calcularon utilizando el factor de emisión igual a 0,3531 KgCO₂/KWh.

Tabla 42. Emisiones asociadas al proceso

PARÁMETRO	MEZCLADO (Kg CO ₂ /Kg)	CURADO ELÉCTRICO (Kg CO ₂ /Kg)
CO ₂ equivalente	0,00089	0,11299

Como producto de los procesos descritos se obtiene un indicador total de emisión de 0,39 KgCO₂/Kg de material activado discriminado como se reporta en la Tabla 43.

Tabla 43. Emisiones asociadas

Parámetro	Materias primas	Proceso		Total (Kg CO ₂ /Kg)
		Mezclado	Curado eléctrico	
CO ₂ e	0,28	0,00089	0,11299	0,39

Como se puede observar en la tabla anterior el producto presenta unas emisiones asociadas que son inferiores a la atribuidas a la fabricación del cemento portland ordinario. Sin embargo, el cemento Portland no es equiparable al producto obtenido dado que la función es diferente. Es decir, el material que fue analizado en esta aproximación al ciclo de vida se asemeja mas a un mortero que al cemento y por lo tanto la comparación no se puede realizar directamente sino que depende de la aplicación que se haga con el cemento y su modo de utilización.

Por otra parte se debe considerar el hecho de que la utilización de este material no genera cargas ambientales por la explotación de recursos naturales (ejemplo: canteras de rocas calizas para la producción de cemento). Sino que es una técnica que mediante el reciclaje de un residuo, el cual fue producido en función de la obtención de otro producto (en este caso tinción de telas) pretende obtener un producto nuevamente útil para la sociedad.

Si bien es cierto lo anterior, también se reconoce que la utilización de cenizas que se desechan en diferentes industrias del Valle de Aburrá tienen un potencial de aprovechamiento. En el caso específico de las cenizas utilizadas para el presente estudio, su utilización supone un beneficio ambiental, dado que este material estaba siendo dispuesto de forma inadecuada en un terreno no apto para estos materiales. Como alternativa de manejo se presenta la activación alcalina, técnica que bajo los parámetros utilizados en el presente estudio puede alcanzar resistencias superiores a 3 MPa pero inferiores a 5 MPa por lo que su utilización es viable para elementos no estructurales con la ventaja que puede estar expuesto al ambiente (hubo muestras que fueron curadas sumergidas en agua), lo que representa una ventaja frente a otros materiales decorativos en el mercado.

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Boccaccini y G. Ondracek. (1995, Nuevos materiales a partir de residuos. *Ciencia Hoy*. Available: <http://www.cienciahoy.org.ar/hoy29/residuos01.htm>
- [2] L. M. Ahumada y J. E. Rodríguez-Páez, "Uso del SiO₂ obtenido de la cascarilla de arroz en la síntesis de silicatos de calcio," *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, vol. 30, pp. 581-594, Diciembre 2006.
- [3] G. Alliance, "Geopolymer Technology; an opportunity to enhance the sustainability of the mining and construction industries."
- [4] E. Álvarez-Ayuso, X. Querol, F. Plana, A. Alastuey, N. Moreno, M. Izquierdo, O. Font, T. Moreno, S. Diez, E. Vázquez, y M. Barra, "Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion fly ashes," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 154, pp. 175-183, 2008. 0304-3894.
- [5] S. Andini, R. Cioffi, F. Colangelo, T. Grieco, F. Montagnaro, y L. Santoro, "Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products," *Waste Management*, vol. 28, pp. 416-423, 2008. doi:10.1016/j.wasman.2007.02.001
- [6] G. Cárdenas. (sin fecha, Diciembre 20 de 2009). Utilización de los desechos del carbón: Construir a partir de las cenizas. *Agencia Universitaria de Periodismo Científico*. Available: <http://aupec.univalle.edu.co/AUPEC/anteriores/cenizas.html>
- [7] M. Criado Sanz, "Tesis doctoral: Nuevos materiales cementantes basados en la activación alcalina de cenizas volantes. Caracterización de geles N-A-S-H en función del contenido de sílice soluble. Efecto de Na₂SO₄," Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2007.
- [8] R. Mejía De Gutiérrez, S. Bernal, y E. Rodríguez, "Nuevos concretos para el aprovechamiento de un sub-producto industrial," *Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales*, pp. 517-523, 2006.
- [9] L. F. Velásquez Vallejo, J. F. De La Cruz Morales, J. F. Sánchez Morales, y M. A. Marín Laverde, "Remoción de carbón inquemado de las cenizas volantes producidas en el proceso de combustión de carbón," *Energética*, pp. 107-112, Diciembre 2007. ISSN: 0120-9833.
- [10] *C109/C 109M-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50-mm] Cube Specimens)*, 2002.
- [11] *C1437-01. Standard test method for flow of Hydraulic Cement mortar*, 2001.
- [12] B. Rangan. (2008, Junio 4 de 2010). *Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Available: <http://www.yourbuilding.org/article/NewsDetail.aspx?p=83&id=1570>
- [13] J. Davidovits, "Mineral polymers and methods of making them," Estados Unidos Patent 4349386, 1982.
- [14] D. Vargas Del Río, P. F. Zarate Del Valle, y H. Gutierrez Pulido, "Actividad puzolánica de las tobas pumíticas de la zona metropolitana de Guadalajara.," *e-Gnosis*, vol. 3, 2005. ISSN: 1665-5745.
- [15] *Adiciones al hormigón. Cenizas volantes: definición, especificaciones especificaciones, transporte y almacenamiento de las cenizas volantes utilizadas como adición a los hormigones y morteros de cemento Pórtland*, UNE 83-415-87, 1987.
- [16] C.-I. C. O. E. F. S. Development. *Fly-Ash Concrete*. Available: www.flyashconcrete.in
- [17] "Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación adoptado por la conferencia de Plenipotenciarios del 22 de Marzo de 1989," ed. Basilea, 1999.

- [18] J. Temuujin y A. Van Riessen, "Effect of fly ash preliminary calcination on the properties of geopolimer," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 164, pp. 634-639, 2009. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.08.065.
- [19] M. Ospina, D. Rendón, y R. Mejía De Gutiérrez, "Evolución del comportamiento de la sílice obtenida a partir de un subproducto industrial en morteros de cemento Portland," *Scientia Et technica*, vol. 13, pp. 461-466, Septiembre 2007. ISSN: 0122-1701.
- [20] D. M. Roy, "Alkali-activated cements Opportunities and challenges," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 249-254, 1999. 0008-8846.
- [21] E. Database, "Ecoinvent data v 2.0," ed, 2007.
- [22] J. Davidovits, "Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries," *World Resources Review*, vol. 6, pp. 263-278, 1994.
- [23] M. Cárdenas, C. Mejía, y F. García, *La Industria del cemento en Colombia: FEDESARROLLO*, 2007.
- [24] O. Restrepo Baena, "Efectos de algunas adiciones minerales colombianas en la fabricación del clínker para cemento Portland I," Maestría, Escuela de Ingeniería de Materiales. Maestría en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2006.
- [25] J. Maldonado Villa, "Tesis doctoral: Concreto de alto desempeño a partir de una mezcla de escoria siderúrgica activada alcalinamente," Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2009.
- [26] M. Cárdenas S., C. Mejía M., y F. García A., "La Industria del cemento en Colombia," *Working Papers Series - Documentos de trabajo*, Enero 2007.
- [27] R. Lloyd, J. Provis, y J. Deventer, "Microscopy and microanalysis of inorganic polymer cements. 1: remnant fly ash particles," *Journal of Materials Science*, vol. 44, pp. 608-619, 2009. 00222461. 10.1007/s10853-008-3077-0
- [28] L. Zheng, W. Wang, y Y. Shi, "The effects of alkaline dosage and Si/Al ratio on the immobilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash-based geopolimer," *Chemosphere*, vol. 79, pp. 665-671, 2010. 0045-6535.
- [29] A. Palomo, M. W. Grutzeck, y M. T. Blanco, "Alkali Activated Fly Ashes, A cement to the Future," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1323-1329, 1999.
- [30] D. W. Radford, A. Grabher, y J. Bridge, "Inorganic Polymer Matrix Composite Strength Related to Interface Condition," *Materials*, pp. 2216-2227, 2009. ISSN 1996-1944 doi:10.3390.
- [31] Z. Yunsheng, S. Wei, C. Qianli, y C. Lin, "Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolimer," *Journal of Hazardous Materials*, pp. 206-213, 2007. doi:10.1016/j.jhazmat.2006.09.033
- [32] J. Davidovits, "GEOPOLYMERS: Man-Made Rock Geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement," *Journal of materials education*, vol. 16, pp. 91-139, 1994.
- [33] A. T. M. U. O. C. C. Products. (2008, 11/09/2011). *CCP Basics*. Available: <http://aca.affiniscape.com/displaycommon.cfm?an=1&subarticlenbr=149>
- [34] *ASTM C618-08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, 2008.
- [35] S. Bernal López, M. Gordillo, R. Mejía De Gutiérrez, E. Rodríguez Martínez, S. Delvasto Arjona, y R. Cuero, "Modelamiento de la resistencia a la compresión de concretos alternativos, usando la metodología de superficie de respuesta," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, pp. 112-123, Septiembre 2009.
- [36] A. Fernández Jiménez y A. Palomo Sánchez, "Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements," *Fuel*, vol. 82, pp. 2259-2265, 2003.

- [37] P. U. C. D. Perú. (2010, 13/09/2011). *Ciclo de Vida Ambiental*. Available: <http://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/index.php/es/pensamiento-ciclo-vida/analisis-de-ciclo-de-vida-ambiental.html>
- [38] C. Verdager. (2000, 20 enero de 2010). De la sostenibilidad a los ecobarrios. *Habitat*. Available: <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n14/acver.html>
- [39] "Estudio de factibilidad del área Amagá Venecia Bolombolo," SEDIC-SERVIMINAS1990.
- [40] C. N. D. P. E. Y. Social, "CONPES 3305 de 2004. Lineamientos para optimizar la política de desarrollo urbano," 2004.
- [41] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, y B. V. Rangan, "On the development of fly ash-based geopolymer concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 101, pp. 467-472, Noviembre-Diciembre 2004.
- [42] C. Villa, E. T. Pecina, R. Torres, y L. Gómez, "Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite," *Construction and Building Materials*, vol. In Press, Corrected Proof. 0950-0618.
- [43] R. S. Iyer y J. A. Scott, "Power station fly ash -- a review of value-added utilization outside of the construction industry," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 31, pp. 217-228, 2001. 0921-3449.
- [44] M. Ahmaruzzaman, "A review on the utilization of fly ash," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, pp. 327-363, 2010. 0360-1285.
- [45] A. Sathonsaowaphak, P. Chindapasirt, y K. Pimraksa, "Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 168, pp. 44-50, 2009. 0304-3894.
- [46] Y. Hansen, P. Notten, y J. Petrie, "The environmental impact of ash management in coal-base power generation," *Applied Geochemistry*, vol. 17, pp. 1131-1141, 2003. doi:10.1016/S0883-2927(02)00013-6.
- [47] J. Pérez, F. Chejne, A. Ocampo, A. Blandón, E. Arenas, y N. Lopera, "Control de calidad de carbones en el circuito industrial del Valle de Aburrá," *Energética*, pp. 57-63, 2002.
- [48] J. Temuujin, A. Van Riessen, y K. J. D. Mackenzie, "Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars," *Construction and Building Materials*, pp. In press, corrected proof, 2010. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.012.
- [49] K. Sagoe-Crentsil, "Geopolymers: building blocks of the future."
- [50] G. Institute, "LTGS Brick, low cost construction material," 2006.
- [51] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, y M. Criado, "Activación alcalina de cenizas volantes. Estudio comparativo entre activadores sódicos y potásicos," *Materiales de construcción*, vol. 56, pp. 51-65, Enero-Marzo 2006. ISSN: 0465-2746.
- [52] I. García-Lodeiro, A. Palomo, y A. Fernández-Jiménez, "Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems," *Cement and Concrete Research*, vol. 37, pp. 175-183, 2007. doi:10.1016/j.cemconres.2006.11.002.
- [53] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. Provis, G. Lukey, P. A, y J. Van Deventer, "Geopolymer technology: the current state of the art," *Journal of Materials Science*, vol. 42, pp. 2917-2933, 2006. 10.1007/s10853-006-0637-z
- [54] M. D. A. V. Y. D. Territorial, N. S. Studies, y W. Bank, "Estudio de estrategia nacional para la implementación del MDL en Colombia," ed. Bogotá, 2000.
- [55] R. Lloyd, J. Provis, y J. Deventer, "Microscopy and microanalysis of inorganic polymer cements. 2: the gel binder," *Journal of Materials Science*, vol. 44, pp. 620-631, 2009. 00222461. 10.1007/s10853-008-3078-z

- [56] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, y J. S. J. Van Deventer, "The role of inorganic polymer technology in the development of "green concrete",
Cement and Concrete Research, vol. 37, pp. 1590-1597, 2007. 0008-8846. 10.1016/j.cemconres.2007.08.018
- [57] M. Izquierdo, X. Querol, J. Davidovits, D. Antenuccic, y C. Fernández-Pereira, "Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching,"
Journal of hazardous materials, vol. 166, pp. 561-566, Julio 2009. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.11.063.
- [58] E. Álvarez-Ayuso, X. Querol, F. Plana, A. Alastuey, N. Moreno, M. Izquierdo, O. Font, T. Moreno, S. Diez, E. Vázquez, y M. Barra, "Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion fly ashes,"
Journal of Hazardous Materials, vol. 154, pp. 175-183, Junio 2008. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.10.008
- [59] D. H. Steenie E. Wallah, Dody M.J. Sumajouw, B.Vijaya Rangan, "Performance of fly ash-based geopolymer concrete under sulfate and acid exposure,"
Geopolymer: green chemistry and sustainable development solutions, p. 4, s.f.
- [60] F.-J. Kovalchuk G, Palomo, "Activación alcalina de cenizas volantes. Relación entre el desarrollo mecánico resistente y la composición química de la ceniza,"
Materiales de construcción, vol. 58, p. 18, 2008. ISSN 0465-2746.
- [61] E. Rodríguez, R. Mejía De Gutierrez, S. Bernal, y M. Gordillo, "Efecto de los módulos SiO₂/Al₂O₃ y Na₂O/SiO₂ en las propiedades de sistemas geopoliméricos basados en un metacaolín,"
Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, pp. 30-40, Septiembre 2009.
- [62] F.-J. Monzó, Vicent, Palomo, Barba, "Activación alcalina de metacaolín. Efecto de la adición de silicato soluble y de la temperatura de curado,"
Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio, vol. 47, p. 9, 2008.
- [63] Z. Pan, J. Sanjayan, y B. Rangan, "An investigation of the mechanisms for strength gain or loss of geopolymer mortar after exposure to elevated temperature,"
Journal of Materials Science, vol. 44, pp. 1873-1880, 2009. 00222461. 10.1007/s10853-009-3243-z
- [64] D. Hardjito y B. V. Rangan, "Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete, Research Report GC1,"
Faculty of Engineering, Curtin University of Technology 2005.
- [65] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, y M. Criado, "Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model,"
Cement and Concrete Research, vol. 35, pp. 1204-1209, 2005. doi:10.1016/j.cemconres.2004.08.021
- [66] A. Palomo Sánchez, A. Fernández-Jiménez, y M. Criado Sanz, "Geopolímeros: una única base química y diferentes microestructuras,"
Materiales de construcción, vol. 54, pp. 75-91, 2004.
- [67] R. Salcedo. (2010, 20/09/2011). *Ciclón electrostático. Mejor control de la emisión de partículas*. Available: <http://www.bioenergyinternational.es/noticias/News/show/ciclonelectrostatico-mejor-control-de-la-emision-de-particulas-249>
- [68] *C778-02. Standard Specification for Standard Sand.*, 2003.
- [69] *C305-99. Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency*, 1999.
- [70] P. De Silva y K. Sagoe-Crenstil, "Medium-term phase stability of Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O geopolymer systems,"
Cement and Concrete Research, vol. 38, pp. 870-876, 2008. 0008-8846.
- [71] E.-I. A. Laboratories. (s.f, 18/09/2011). *Loss On Ignition (L.O.I.)*. Available: http://www.xrf.ethz.ch/xrf_instr_LOI.html#Anchor-Instructio-251

- [72] Sacim y A. E. D. T. Cerámicos, *Tecnología Cerámica Aplicada* vol. 1. Castellon, 2004.
- [73] *Environmental Management - Life cycle assessment - Principles and framework*, 1997.
- [74] H. Gutiérrez Pulido y R. De La Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, 2 ed. México: Mc Graw Hill, 2008.
- [75] S. B. Universidad Nacional De Colombia, "ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS NORMALES DE CONCRETO," s.f.
- [76] E. D. T. M. D. V. D. Aburrá y C. N. D. P. M. L. Y. T. Ambientales, "Cable Cars Metro. PROJECT DESIGN DOCUMENT FORM (CDM-SSC-PDD) - Version 03," Medellín, Colombia 2006.
- [77] I. B. Company, "Eco-profiles of the European Plastics Industry. SODIUM HYDROXIDE," 2005.
- [78] U. N. F. C. O. C. Change. (1995, *Global Warming Potentials*. Available: http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php

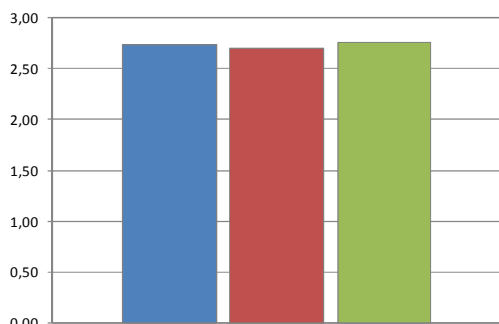
11 ANEXOS

11.1 EMISIONES PRODUCCIÓN HIDRÓXIDO DE SODIO

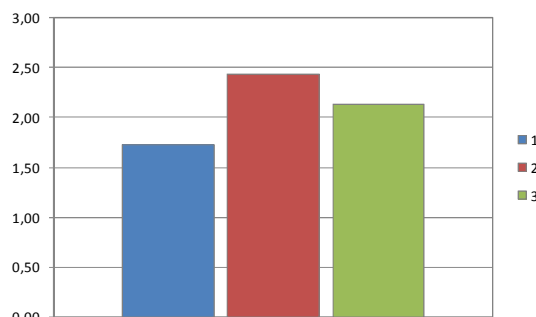
Emission	From fuel (mg)	From fuel (mg)	From transpo (mg)	From process (mg)	From biomas (mg)	From fugitive (mg)	Totals (mg)
dust (PM10)	350	83	2	110	-	-	540
CO	740	150	23	1	-	-	910
CO ₂	440000	68000	3800	570	-5800	-	110000
SOX as SO ₂	2900	1900	34	<1	-	-	4800
H ₂ S	<1	-	<1	<1	-	-	<1
mercaptan	<1	<1	<1	<1	-	-	<1
NOX as NO ₂	1300	1700	34	10	-	-	3000
NH ₃	<1	-	<1	<1	-	-	<1
Cl ₂	<1	<1	<1	<1	-	-	<1
HCl	46	13	<1	<1	-	-	59
F ₂	<1	<1	<1	<1	-	-	<1
HF	2	<1	<1	<1	-	-	2
hydrocarbons not specified	510	110	10	<1	-	<1	640
aldehyde (-CHO)	<1	-	<1	<1	-	-	<1
organics	<1	<1	<1	<1	-	-	<1
Pb+compounds as Pb	<1	<1	<1	<1	-	-	<1
Hg+compounds as Hg	<1	-	<1	<1	-	-	<1
metals not specified	1	1	<1	<1	-	-	2
H ₂ SO ₄	<1	-	<1	<1	-	-	<1
N ₂ O	<1	<1	<1	<1	-	-	<1
H ₂	28	<1	<1	260	-	-	290
dichloroethane (DCE)	<1	-	<1	<1	-	<1	<1
vinyl chloride monomer	<1	-	<1	<1	-	<1	<1
CFC/HCFC/HFC not	<1	-	<1	<1	-	-	<1
organo-chlorine not	<1	-	<1	<1	-	-	<1
HCN	<1	-	<1	<1	-	-	<1
CH ₄	11000	230	<1	65	-	<1	12000
aromatic HC not specified	<1	-	<1	<1	-	<1	<1
polycyclic hydrocarbons	<1	<1	<1	<1	-	-	<1
NMVOC	<1	-	<1	<1	-	-	<1
CS ₂	<1	-	<1	<1	-	-	<1
methylene chloride	<1	-	<1	<1	-	-	<1
Cu+compounds as Cu	<1	<1	<1	<1	-	-	<1
As+compounds as As	-	-	-	<1	-	-	<1
Cd+compounds as Cd	<1	-	<1	<1	-	-	<1
Ag+compounds as Ag	-	-	-	<1	-	-	<1
Zn+compounds as Zn	<1	-	<1	<1	-	-	<1
Cr+compounds as Cr	<1	<1	<1	<1	-	-	<1
Se+compounds as Se	-	-	-	<1	-	-	<1
Ni+compounds as Ni	<1	<1	<1	<1	-	-	<1
Sb+compounds as Sb	-	-	<1	<1	-	-	<1
ethylene C ₂ H ₄	-	-	<1	<1	-	-	<1
oxvgen	-	-	-	<1	-	-	<1
asbestos	-	-	-	<1	-	-	<1
dioxin/furan as Teq	-	-	-	<1	-	-	<1
benzene C ₆ H ₆	-	-	-	<1	-	<1	<1
toluene C ₇ H ₈	-	-	-	<1	-	<1	<1
xvlenes C ₈ H ₁₀	-	-	-	<1	-	<1	<1
ethylbenzene C ₈ H ₁₀	-	-	-	<1	-	<1	<1
styrene	-	-	-	<1	-	<1	<1
propylene	-	-	-	<1	-	-	<1

Fuente: Plastics Europe, 2005

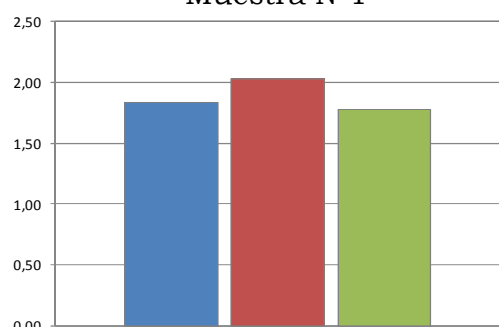
11.2 RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESIÓN (MPa)



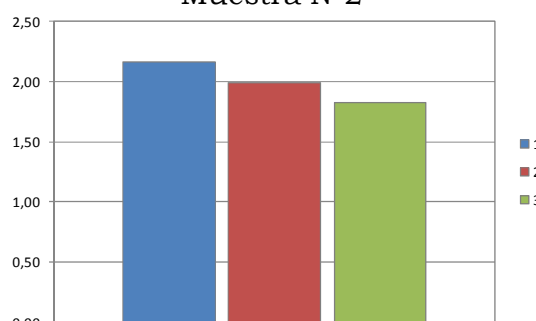
Muestra N°1



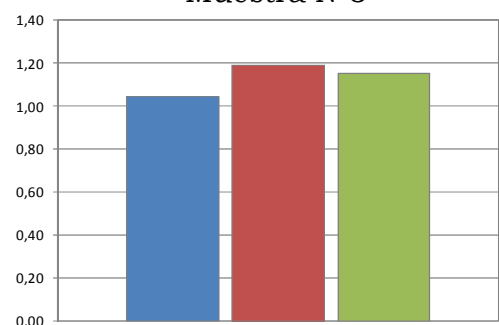
Muestra N°2



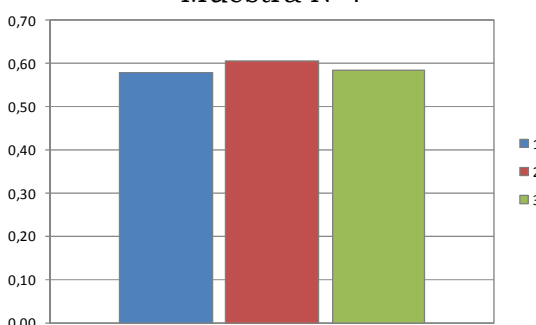
Muestra N°3



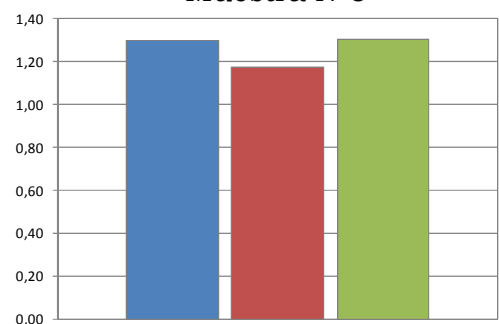
Muestra N°4



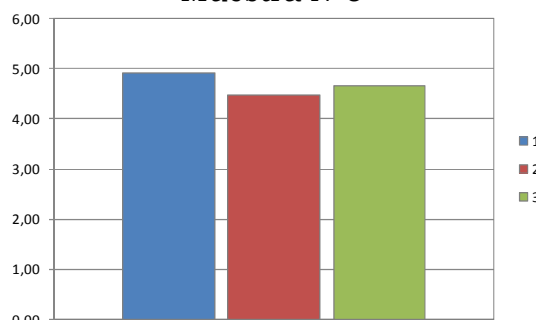
Muestra N°5



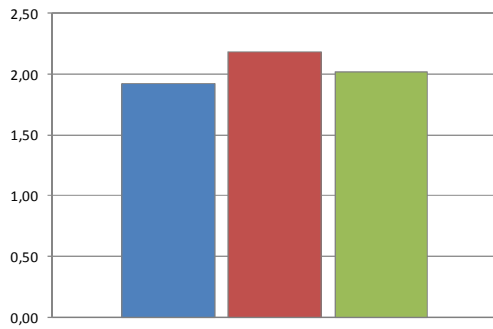
Muestra N°6



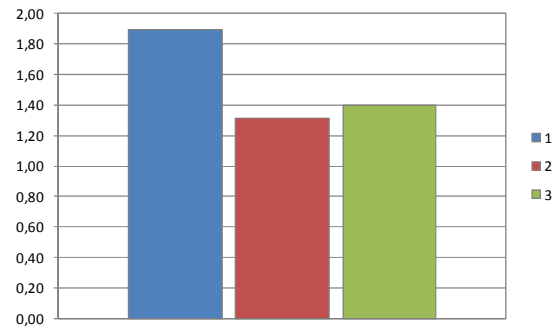
Muestra N°7



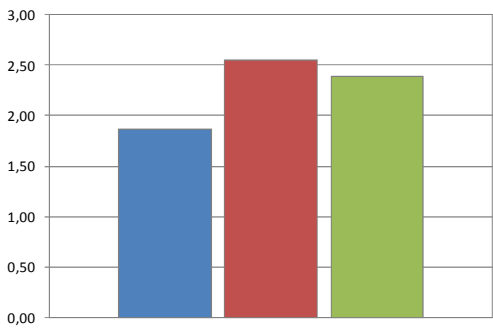
Muestra N°8



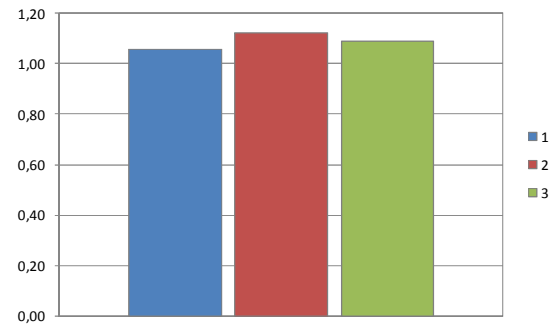
Muestra N°9



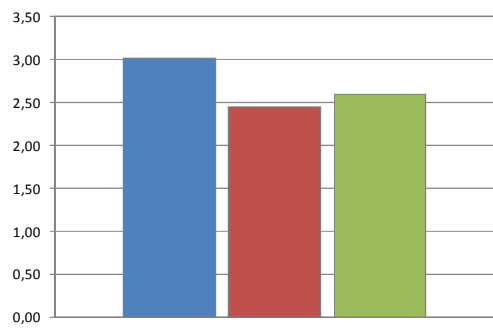
Muestra N°10



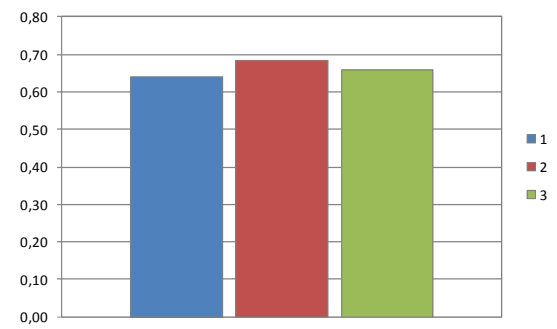
Muestra N°11



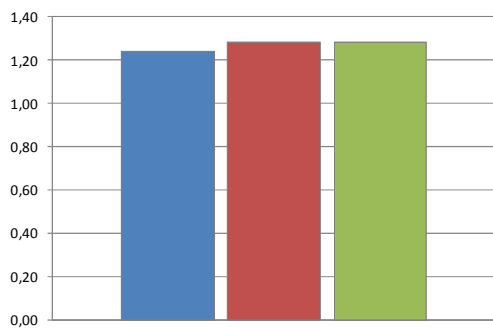
Muestra N°12



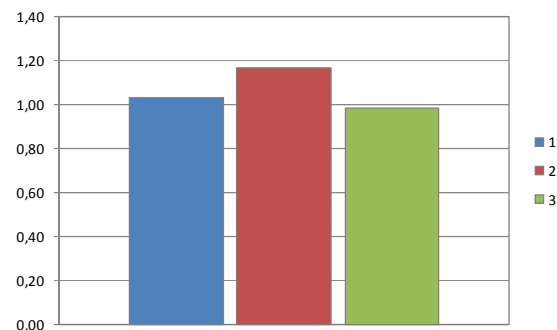
Muestra N°13



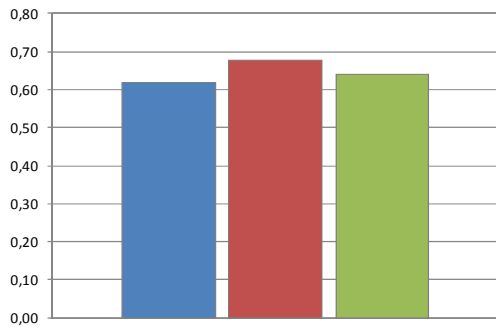
Muestra N°14



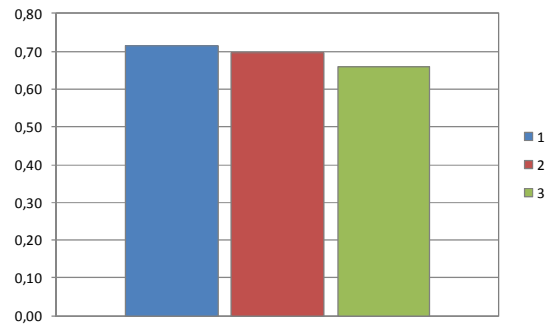
Muestra N°15



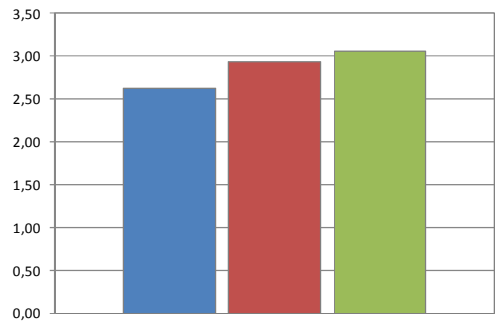
Muestra N°16



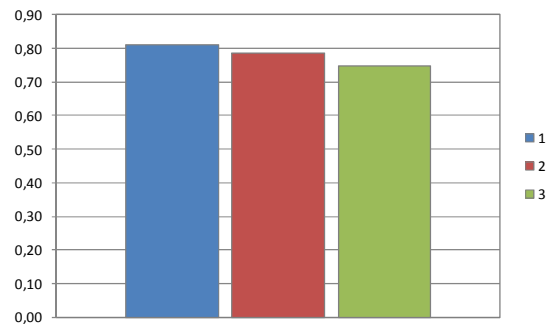
Muestra N°17



Muestra N°18



Muestra N°19



Muestra N°20

11.3 Referencia NASH

Name and formula

Reference code:	01-075-2318
ICSD name:	Sodium Aluminum Silicate Hydrate
Empirical formula:	$\text{Al}_2\text{H}_{3.30}\text{Na}_{2.62}\text{O}_{9.98}\text{Si}_{2.01}$
Chemical formula:	$(\text{Na}_2\text{O})_{1.31}\text{Al}_2\text{O}_3 (\text{SiO}_2)_{2.01} (\text{H}_2\text{O})_{1.65}$

Crystallographic parameters

Crystal system:	Hexagonal
Space group:	P63
Space group number:	173

a (Å):	12.6780
b (Å):	12.6780
c (Å):	5.1790
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	120.0000

Calculated density (g/cm ³):	2.30
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	720.90
Z:	3.00

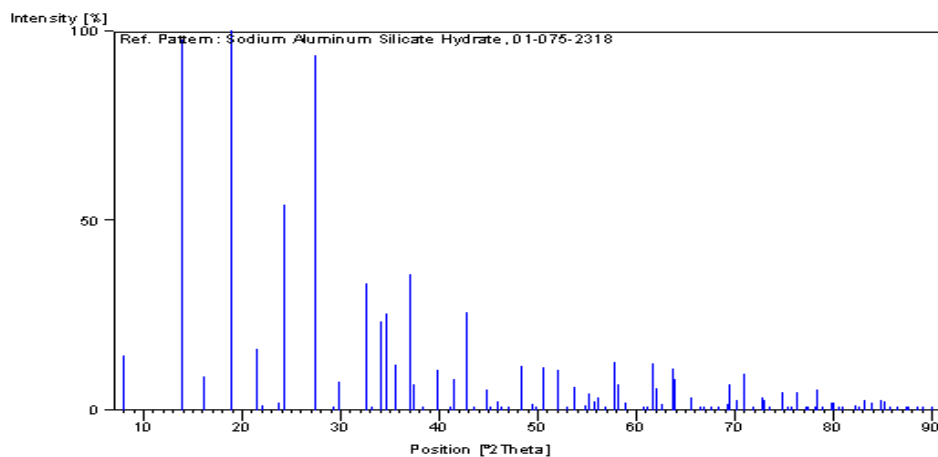
RIR:	0.93
------	------

Comments

ICSD collection code:	032582
-----------------------	--------

References

Primary reference:	(1997)
Structure:	Pahor, N.B., Calligaris, M., Nardin, G., Randaccio, L., 38 , 893, (1982)



11.4 Referencia SiO₂

Name and formula

Reference code: 00-034-0717
PDF index name: Silicon Oxide
Empirical formula: O₂Si
Chemical formula: SiO₂

Crystallographic parameters

Crystal system Unknown

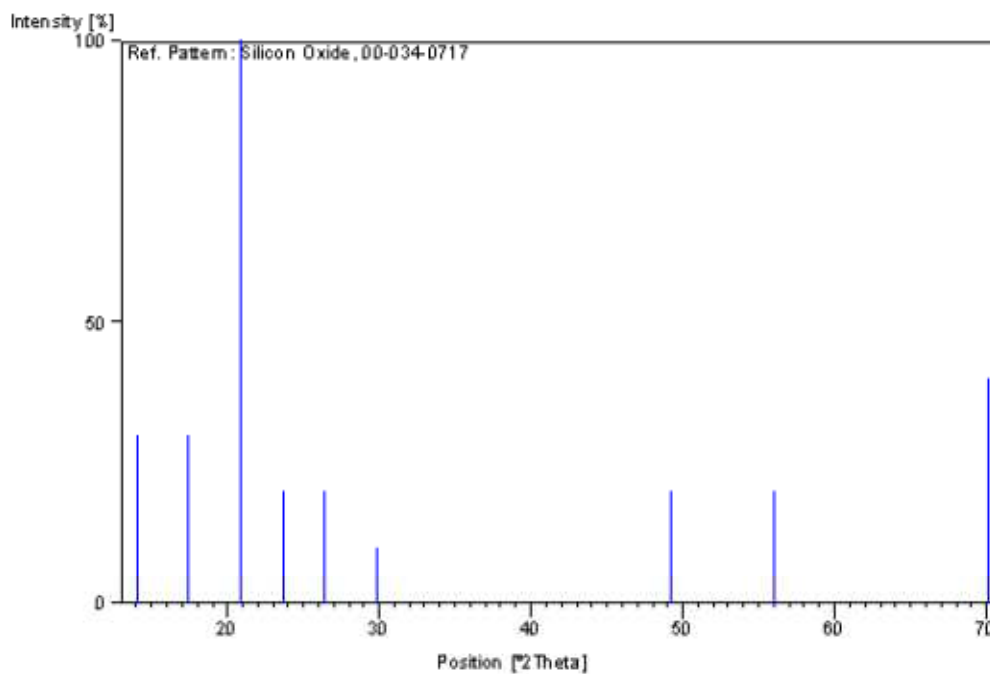
RIR -

Comments

Sample preparation Made hydrothermally from silica gel at temperatures of 150-280°C. there was KOH and NaOH in the solution.

References

Primary reference Mitsyuk B. et al., 13, 101, (1976)



11.5 Referencia Tenardita

Name and formula

Reference code: 01-074-2036
PDF index name: Thenardite
Empirical formula: $\text{Na}_2 \text{O}_4\text{S}$
Chemical formula: Na_2SO_4

Crystallographic parameters

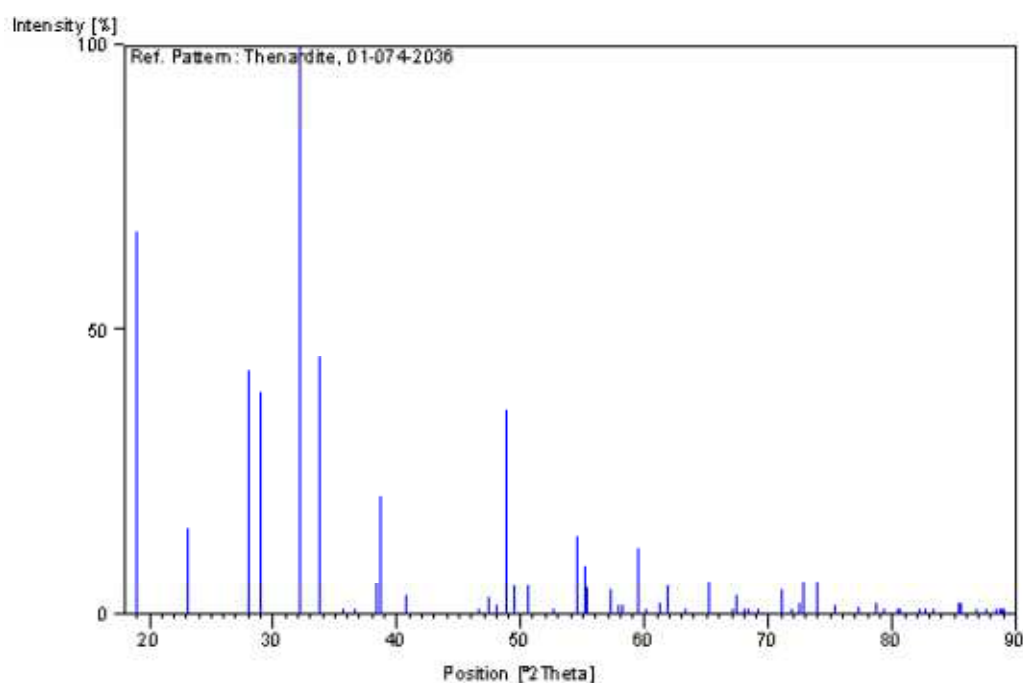
Crystal system: Orthorhombic
Space group: Fddd
Space group number: 70
RIR: 1,60
-

Comments

ICSD collection code: 028056

References

Primary reference: (1997)
Hawthorne. F.C., Ferguson. R.B., 13, 181. (1975)



11.6 Referencia Cuarzo

Name and formula

Reference code: 01-079-1906
PDF index name: Quartz
Empirical formula: O_2Si
Chemical formula: SiO_2

Crystallographic parameters

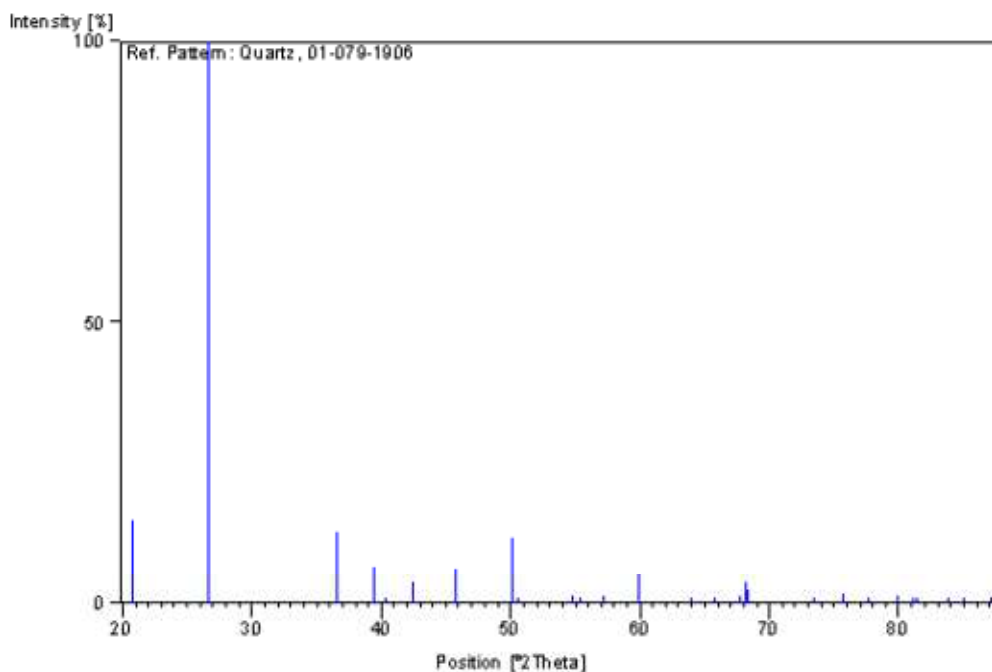
Crystal system: Hexagonal
Space group: P3121
Space group number: 152

Comments

ICSD collection code: 067117

References

Primary reference: (1997)
Dubrovinskii, L.S., Nozik, Y.Z, 306. 1384 (1989)



11.7 Referencia Nefelina

Name and formula

Reference code: 01-076-2469
Mineral name: Nepheline
ICSD name: Sodium Potassium Aluminum Silicate
Empirical formula: $Al_{3.52}KNa_3O_{16}Si_{4.48}$
Chemical formula: $Na_3K (Si_{0.56}Al_{0.44})_8O_{16}$

Comments

ICSD collection code: 037358
Test from ICSD: Charge sum slightly deviates from zero.

References

Primary reference: (1997)
Structure: Foreman, N., Peacor, D.R., 132, 45, (1970)

