

# APLICACIONES DE LOS NUTRIENTES TECNOLÓGICOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA DEL ÁREA METROPOLITANA DE CÚCUTA

Jorge Sánchez Molina  
Francisco Antonio Corpas  
Diana Carolina Álvarez Rozo



Universidad  
Francisco de Paula Santander







**APLICACIONES  
DE LOS NUTRIENTES  
TECNOLÓGICOS EN LA  
INDUSTRIA CERÁMICA  
DEL ÁREA METROPOLITANA  
DE CÚCUTA**

JORGE SÁNCHEZ MOLINA  
FRANCISCO ANTONIO CORPAS IGLESIAS  
DIANA CAROLINA ÁLVAREZ ROZO

Aplicaciones de los nutrientes tecnológicos en la industria cerámica del área metropolitana de Cúcuta / Jorge Sánchez Molina, Francisco Antonio Corpas, Diana Carolina Álvarez Rozo.  
-- 1a. ed. -- Bogotá : Ecoe Ediciones : Universidad Francisco de Paula Santander, 2019.  
184 p. -- (Ingeniería y salud en el trabajo. Ingeniería)

"Incluye: Avances en el uso de residuos orgánicos e inorgánicos en materiales cerámicos de construcción. Interesantes propiedades tecnológicas de los materiales cerámicos obtenidos. Incidencia ambiental de los materiales de construcción sostenible" -- Contiene: complemento virtual SIL (Sistema de Información en Línea) [www.ecoedediciones.com](http://www.ecoedediciones.com). -- Incluye datos biográficos de los autores. -- Contiene bibliografía.


ISBN 978-958-771-704-4

1. Industria cerámica – Cúcuta 2. Industria de la arcilla – Cúcuta 3. Aprovechamiento de residuos industriales I. Corpas, Francisco Antonio II. Álvarez Rozo, Diana Carolina III. Título IV. Serie

CDD: 691.4 ed. 23

CO-BoBN– a1038583

---

 **Colección:** Ingeniería y salud en el trabajo  
**Área:** Ingeniería

ECOE  
EDICIONES

UF  
PS  
Universidad  
Francisco de Paula Santander

- ▶ Jorge Sánchez Molina
- ▶ Francisco Antonio Corpas
- ▶ Diana Carolina Álvarez Rozo

© Ecoe Ediciones Limitada.  
Carrera 19 # 63C 32, Tel.: 248 14 49  
Bogotá, Colombia

© Universidad Francisco  
de Paula Santander  
Avenida Gran Colombia  
No. 12E-96 Barrio Colsag  
San José de Cúcuta - Colombia  
Teléfono (057)(7) 5776655

**Primera edición:** Bogotá, diciembre de 2018

**ISBN:** 978-958-771-704-4

Coordinación editorial: Angélica García Reyes  
Corrección de estilo: Juan Mikan  
Diagramación: Alfonso Álvarez  
Carátula: Wilson Marulanda Muñoz  
Impresión: DGP Editores  
Calle 63 # 70 D -34

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio  
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

*Impreso y hecho en Colombia - Todos los derechos reservados*

# DEDICATORIA

A mi madre Rosa Mery Molina por su comprensión y voz de aliento en cada momento de mi vida.

A mi esposa Yaneth Zúñiga, y mi hija, Jessica Viviana Sánchez Zúñiga, por su amor y apoyo en mis labores diarias y por ser la motivación para alcanzar los objetivos propuestos.

**Jorge Sánchez Molina**

A mi esposa Magdalena, inspiración de mis labores diarias.

**Francisco A. Corpas Iglesias**

A mi madre, mi maestra de vida, por formarme en valores y con principios éticos, por su amor incondicional, por acompañarme en cada etapa de mi vida.

**Diana C. Álvarez Rozo**





# AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Jaén, en especial a la Escuela Politécnica Superior de Linares, por la orientación hacia el empleo de los nutrientes tecnológicos en la industria cerámica. Al Grupo TEP-222 por su apoyo en la realización de esta investigación y por permitir la realización de ensayos en sus laboratorios.

A la Universidad Francisco de Paula Santander, en especial al Centro de Investigación de Materiales Cerámicos (CIMAC), el cual cuenta con la infraestructura y equipos necesarios para la realización de ensayos de esta investigación. Al Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica (GITEC), en donde se han realizado numerosas investigaciones dirigidas a mejorar el sector cerámico de la región, logrando articular la relación universidad-empresa-Estado.



# CONTENIDO

<b>PREFACIO</b> .....	XXIII
<b>RESUMEN</b> .....	XXVII
<b>ABSTRACT</b> .....	XXIX
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	XXXI
<b>CAPITULO I. INCORPORACIÓN DE LOS NUTRIENTES TECNOLÓGICOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA DEL ÁREA METROPOLITANA DE CÚCUTA DE CÚCUTA</b> .....	1
1. La industria cerámica del área metropolitana de Cúcuta .....	1
1.1 Distribución geográfica de las industrias cerámicas .....	2
2. Economía circular .....	4
2.1 Generación de residuos industriales y el rol de la economía circular .....	4
2.2 Principios y aplicación de la economía circular .....	5
2.3 La economía circular en la industria manufacturera .....	6
2.4 Nutrientes tecnológicos en la industria cerámica .....	7

3. Procesos industriales de donde se generan los nutrientes tecnológicos empleados .....	8
3.1 Proceso productivo del arroz .....	8
3.2 Proceso productivo del café .....	10
3.3 Proceso productivo de la central termoeléctrica .....	11
3.4 Proceso de fabricación de productos cerámicos .....	13
4. Nutrientes tecnológicos producidos en la región .....	17
4.1 Residuos orgánicos .....	17
4.2 Residuos inorgánicos .....	22
4.3 Importancia del uso de residuos como nutrientes tecnológicos en la industria cerámica .....	28
4.3.1 Residuos orgánicos .....	28
4.3.2 Residuos inorgánicos .....	28
5. Investigaciones realizadas en el entorno internacional y nacional .....	30
<b>CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS EMPLEADAS .....</b>	<b>37</b>
6. Material arcilloso .....	37
7. Cascarilla de arroz .....	38
8. Cisco de café .....	39
9. Cenizas volantes de central termoeléctrica .....	39
10. Inquemados del proceso de cocción en horno colmena en la industria cerámica regional .....	40
11. Proceso cerámico realizado .....	40
11.2 Formulación de pastas .....	40
11.3 Secado de las piezas cerámicas .....	42
11.4 Cocción .....	43
12. Técnicas de caracterización de materiales .....	43

---

13. Normas usadas para el establecimiento de las propiedades tecnológicas .....	45
14. Metodología para la selección de la pasta de mejor comportamiento .....	45
<b>CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS .....</b>	<b>47</b>
15. Arcilla La Alejandra .....	47
15.1 Localización del material arcilloso .....	47
15.2 Caracterización estructural .....	48
15.3 Caracterización química.....	50
15.4 Aspectos morfológicos y microquímica .....	51
15.5 Análisis termogravimétrico/calorimetría diferencial de barrido .....	53
16. Cascarilla de arroz .....	55
16.1 Caracterización estructural .....	55
16.2 Caracterización química .....	56
16.3 Caracterización morfológica .....	57
16.4 Caracterización termogravimétrica/calorimétrica .....	57
17. Cisco de café .....	58
17.1 Caracterización estructural.....	58
17.2 Caracterización química .....	59
17.3 Caracterización morfológica .....	60
17.4 Caracterización termogravimétrica/calorimétrica .....	60
18. Cenizas volantes .....	62
18.1 Caracterización estructural .....	62
18.2 Composición química .....	63
18.3 Caracterización morfológica y microquímica .....	64
18.4 Caracterización termogravimétrica/calorimétrica .....	65
19. Inquemados de carbón .....	.66
19.1 Caracterización estructural .....	66
19.2 Composición química .....	67
19.3 Caracterización microestructural.....	68
19.4 Caracterización termogravimétrica/calorimétrica .....	69



<b>CAPÍTULO IV. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES TECNOLÓGICOS SOBRE LAS PRINCIPALES VARIABLES TECNOLÓGICAS DE UN MATERIAL CERÁMICO .....</b>	<b>71</b>
20. Aspectos macroscópicos .....	72
21. Resultados de las propiedades tecnológicas evaluadas .....	78
22. Posibilidades de aplicación de los materiales cerámicos obtenidos .....	90
23. Selección de la pasta con mejor comportamiento en el proceso cerámico .....	92
<b>CAPÍTULO V. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL NUTRIENTE TECNOLÓGICO SOBRE LA MICROESTRUCTURA DEL MATERIAL CERÁMICO SELECCIONADO (CT10=) .....</b>	<b>93</b>
<b>CAPÍTULO VI. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL NUTRIENTE TECNOLÓGICO EN LA CAPACIDAD DE AISLAMIENTO TÉRMICO DEL MATERIAL .....</b>	<b>99</b>
24. Simulación del comportamiento de un bloque hueco de arcilla con adición de cascarilla de arroz, cenizas volantes y cisco de café .....	102
24.1 Datos calculados .....	102
24.2 Procedimiento .....	104
24.3 Resultados.....	105
<b>CAPÍTULO VII. EFECTOS ENERGÉTICOS/AMBIENTALES DE LA PRESENCIA DEL NUTRIENTE TECNOLÓGICO EN EL MATERIAL CERÁMICO DE MEJOR COMPORTAMIENTO .....</b>	<b>109</b>
25. La huella de carbono en el ámbito de la economía circular .....	109
26. La huella de carbono .....	111
26.1 Métodos de cálculo.....	113
26.1.1 Energía embebida .....	114
26.1.2 Metodología de cálculo de HdC y Ee de la aplicación de los nutrientes tecnológicos .....	115
27. Metodología para el cálculo de la huella de carbono .....	117

28. Reglas de Categoría de Producto .....	119
28.1 Establecimiento de límites y alcance .....	120
28.2 Definición de la unidad funcional/unidad declarada .....	120
28.3 Límites del sistema .....	121
28.3.1 Módulos incluidos dentro del estudio .....	122
28.3.2 Recogida de datos. Análisis de inventario .....	123
28.4 Datos de planta de extracción de arcillas .....	123
28.5 Datos de planta generadora de cenizas volantes .....	125
28.6 Datos de transporte de materias primas a planta de producción .....	126
28.7 Datos de planta de producción .....	128
28.8 Datos bibliográficos .....	133
28.9 Los factores de emisión.....	134
28.9.1 Combustible para elementos de transporte y extracción .....	134
28.9.2 Carbón térmico .....	135
28.9.3 El sector eléctrico en Colombia. <i>Mix</i> eléctrico .....	137
29. Análisis de los datos obtenidos.....	139
30.Efectos energéticos asociados al proceso de fabricación .....	140
30.1 Características de materias primas .....	141
30.2 Efecto sobre la energía embebida en el material cerámico .....	143
31. Evaluación de impactos. Proceso convencional .....	143
31.1 Clasificación y organización de datos .....	144
31.1.1 Extracción (A1) .....	145
31.1.2 Transporte a planta (A2) .....	145
31.1.3 Fabricación de productos (A3) .....	146
31.2 Resultados globales.....	149
31.3 Asignación a unidad declarada.....	150
32. Evaluación de impactos. Proceso innovador .....	151
32.1 Clasificación y ordenación .....	152
32.1.1 Extracción (A1) .....	152

- 32.1.2 Transporte a planta (A2) ..... 152
- 32.1.3 Fabricación de productos (A3) ..... 153
- 32.2 Resultados globales..... 155
- 32.3 Asignación a unidad declarada..... 156
- 32.4 Consideraciones finales ..... 156
- 32.5 Análisis comparativo..... 156
  
- CAPÍTULO VIII. EFECTO ECONÓMICO DEL USO DE NUTRIENTES  
TECNOLÓGICOS..... 159**
- 33.Huella de carbono ..... 160
  - 33.1 Ejemplo con una empresa de la región ..... 160
  - 33.2 Aporte de inquemados..... 161
  - 33.3 Efectos energéticos asociados al proceso de fabricación ..... 161
  - 33.4 Resumen de ahorro usando el nutriente tecnológico ..... 162
  
- CONCLUSIONES ..... 163**
- FUTURAS INVESTIGACIONES..... 169**
- REFERENCIAS ..... 171**

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Diagrama de procesos de una arrocera (Burgos, 2011).....	8
FIGURA 2. Proceso productivo del café (Greenberg, 2014).....	10
FIGURA 3. Diagrama funcional del generador de vapor de la central termoeléctrica (López, Tarantino & Aranguren, 2010).....	12
FIGURA 4. Frente de explotación de la materia prima.....	14
FIGURA 5. Trituración y molienda de la materia prima (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016).....	15
FIGURA 6. Humectación y moldeo (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016).....	15
FIGURA 7. Secado (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016).....	16
FIGURA 8. Cocción en el horno colmena.....	17
FIGURA 9. Material arcilloso proveniente de la mina y molido pasante malla 18.....	38
FIGURA 10. Aspecto macroscópico de la cascarilla de arroz.....	38
FIGURA 11. Aspecto macroscópico del cisco de café.....	39
FIGURA 12. Aspecto macroscópico de la ceniza proveniente de termoeléctrica.....	39
FIGURA 13. Aspecto macroscópico de los inquemados del horno colmena.....	40
FIGURA 14. Registro fotográfico de la extrusora usada para el conformado de las probetas.....	42
FIGURA 15. Estufa de secado.....	42
FIGURA 16. Horno empleado para la cocción de las probetas.....	43
FIGURA 17. Mina donde se realizó la explotación del mineral arcilloso.....	47
FIGURA 18. Patrón de difracción de rayos X de la muestra arcillosa.....	49
FIGURA 19. Microfotografía (MEB) del material arcilloso.....	51
FIGURA 20. Perfiles TG y DTG del material arcilloso (atmósfera de aire).....	53
FIGURA 21. Perfil DSC del material arcilloso (atmósfera de aire).....	54
FIGURA 22. Patrón de difracción de rayos X de la cascarilla de arroz.....	55
FIGURA 23. Microfotografías (MEB) de la cascarilla de arroz.....	57

FIGURA 24. Perfiles TG y DTG de la cascarilla de arroz (atmósfera de aire).....	57
FIGURA 25. Perfil DSC de la cascarilla de arroz (atmósfera de aire).....	58
FIGURA 26. Patrón de difracción del cisco de café.....	59
FIGURA 27. Microfotografías (MEB) del cisco de café.....	60
FIGURA 28. Perfiles TG y DTG del cisco de café (atmósfera de aire).....	61
FIGURA 29. Perfil DSC del cisco de café (atmósfera de aire).....	61
FIGURA 30. Patrón de difracción de la ceniza volante.....	62
FIGURA 31. Microfotografías (MEB) de la ceniza volante.....	64
FIGURA 32. Perfiles TG y DTG de la ceniza volante (atmósfera de aire).....	65
FIGURA 33. Perfil DSC de la ceniza volante (atmósfera de aire).....	66
FIGURA 34. Patrón de difracción de rayos X de los inquemados de carbón.....	67
FIGURA 35. Microfotografías (MEB) de los inquemados procedentes del horno colmena.....	68
FIGURA 36. Perfiles TG y DTG de los inquemados del carbón (atmósfera de aire).....	70
FIGURA 37. Perfil DSC de los inquemados del carbón (atmósfera de aire).....	70
FIGURA 38. Aspecto de los cerámicos elaborados con solo material arcilloso (MA).....	72
FIGURA 39. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso y ceniza volante como material sustituto.....	72
FIGURA 40. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso e inquemados de carbón como material sustituto.....	73
FIGURA 41. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso y cisco de café como material sustituto.....	74
FIGURA 42. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso y cascarilla de arroz pasante malla 16 como material sustituto.....	75
FIGURA 43. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso (MA) y cascarilla de arroz pasante malla 80 (CAb) como material sustituto.....	76
FIGURA 44. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso (MA) y cascarilla de arroz pasante malla 200 (CAc) como material sustituto.....	77



FIGURA 45. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con ceniza volante (CT) como material sustituto .....	86
FIGURA 46. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con inquemados de carbón de horno colmena (IC) como material sustituto .....	86
FIGURA 47. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cisco de café (CC) como material sustituto .....	87
FIGURA 48. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cascarilla de arroz pasante malla 16 (CAa) como material sustituto.....	88
FIGURA 49. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cascarilla de arroz pasante malla 80 (CAb) como material sustituto .....	88
FIGURA 50. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cascarilla de arroz pasante malla 200 (CAc) como material sustituto.....	89
FIGURA 51. Patrón de difracción de rayos X del material arcilloso .....	94
FIGURA 52. Patrón de difracción de rayos X con la adición del 10% de cenizas volantes .....	94
FIGURA 53. Microscopia Electrónica de barrido para MA100 and MA90 a diferentes temperaturas (2000X).....	97
FIGURA 54. Distribución de temperatura a lo largo de los puentes térmicos...	106
FIGURA 55. Vista isométrica: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café .....	106
FIGURA 56. Vista lateral: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café.....	107
FIGURA 57. Vista isométrica: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café .....	107
FIGURA 58. Vista lateral: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café.....	108
FIGURA 59. Vista superior: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café .....	108
FIGURA 60. Reparto de las emisiones de GEI en países industrializados (Gelves et al., 2013).....	112

FIGURA 61. Pasos para el cálculo de la HdC (PAS 2050:2011) .....	115
FIGURA 17. Etapa de definición de alcance y límites en el proceso de cálculo (PAS 2050:2011) .....	120
FIGURA 18. Esquema de proceso de fabricación y entradas en el sistema .....	122
FIGURA 19. Etapa de análisis de inventario en el proceso de cálculo (PAS 2050:2011) .....	123
FIGURA 20. Localización del área de extracción de arcillas .....	124
FIGURA 21. Área de extracción de arcillas (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016) .....	125
FIGURA 22. Carga de arcillas para transporte a planta (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016) .....	125
FIGURA 23. Vista de la central termoeléctrica (Termotasajero S.A. E.S.P., 2008) .....	126
FIGURA 24. Modelo de volqueta utilizado en el estudio .....	127
FIGURA 25. Distancia desde la central termoeléctrica a la ladrillera del sector cerámico (ArcGIS webmap) .....	128
FIGURA 26. Ubicación de la ladrillera del sector cerámico (ArcGIS webmap) .....	129
FIGURA 27. Carga de arcillas en tolva (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016).....	130
FIGURA 28. Entrada de productos en el secadero de cámaras (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016) .....	131
FIGURA 29. Hornos colmena y carga de carbón en hornos (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016).....	131
FIGURA 30. Empacado de producto acabado (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016) .....	132
FIGURA 31. Carga de carbón (inferior) para transporte a planta (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2003) .....	136
FIGURA 32. Distribución de sistemas de generación de electricidad en Colombia (UPME, 2010) .....	137
FIGURA 33. Matriz eléctrica por capacidad instalada (UPME, 2017) .....	138
FIGURA 34. Perfil TG de la pasta CT10 (atmósfera de aire).....	142

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Empresas productoras de arroz de Cúcuta.....	18
TABLA 2. Parámetros de los diferentes tipos de arroz.....	18
TABLA 3. Caracterización física de la cascarilla de arroz .....	19
TABLA 4. Caracterización química de la cascarilla de arroz .....	19
TABLA 5. Residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización del café.....	21
TABLA 6. Composición química del cisco de café.....	21
TABLA 7. Composición química de diferentes cenizas volantes.....	24
TABLA 8. Rangos normales de la composición química de las cenizas volantes producidas por diferentes tipos de carbón .....	25
TABLA 9. Especificaciones para las cenizas según norma ASTM C618.....	26
TABLA 10. Características de los inquemados .....	27
TABLA 11. Comportamiento físico mecánico de bloques de arcilla con adición de inquemados.....	30
TABLA 12. Principales investigaciones evidenciadas en el entorno internacional.....	32
TABLA 13. Principales investigaciones evidenciadas en el entorno nacional ...	34
TABLA 14. Formulación de las pastas cerámicas usando nutrientes tecnológicos.....	41
TABLA 15. Composición estructural del material arcilloso .....	49
TABLA 16. Composición química del material arcilloso (FRX).....	50
TABLA 17. Microquímica de algunos granos presentes en el material arcilloso (% atómico) .....	52
TABLA 18. Composición estructural de la cascarilla de arroz (% peso).....	56
TABLA 19. Composición química de la cascarilla de arroz.....	56
TABLA 20. Composición estructural del cisco de café.....	59
TABLA 21. Composición química del cisco de café.....	59
TABLA 22. Composición estructural de la ceniza volante de termoeléctrica....	62
TABLA 23. Composición química de la ceniza volante de termoeléctrica .....	63

TABLA 24. Microquímica de algunas partículas presentes en la ceniza volante (% atómico).....	64
TABLA 25. Composición estructural de los inquemados de carbón en horno colmena.....	67
TABLA 26. Composición química de los inquemados del carbón.....	67
TABLA 27. Microquímica de algunas partículas presentes en los inquemados del carbón (% atómico) .....	69
TABLA 28. Consolidado de los resultados de contracción de secado para los materiales conformados con los diferentes tipos y concentraciones de nutriente .....	78
TABLA 29. Consolidado de los resultados de contracción lineal de cocción....	80
TABLA 30. Consolidado de la prueba de porcentaje de absorción de agua.....	81
TABLA 31. Consolidado de los resultados de resistencia mecánica a la flexión.....	82
TABLA 32. Consolidado de pruebas de resistencia a la abrasión profunda .....	84
TABLA 33. Valores de las propiedades tecnológicas de los cerámicos obtenidos con las pastas de mejor comportamiento.....	90
TABLA 34. Requisitos de baldosas cerámicas.....	91
TABLA 35. Composición microestructural de los materiales cerámicos MA100 y CT10 a diferentes temperaturas (% peso) .....	94
TABLA 36. Variación de la conductividad térmica de MA100 and MA90 con incremento de temperatura.....	99
TABLA 37. Variación de la conductividad térmica (en probetas cilíndricas) de los cerámicos elaborados con el material CC5 al incrementar la temperatura de cocción.....	101
TABLA 38. Temperatura exterior e interior .....	105
TABLA 39. Potencial de calentamiento global de los GEI.....	112
TABLA 40. Mercados a nivel nacional e internacional.....	133
TABLA 41. Análisis comparativo de emisiones CO <sub>2</sub> en Colombia por generación eléctrica (Sistema de Información Eléctrico Colombiano) .....	139
TABLA 42. Valores de HdC y Ee (módulos A1, A2 y A3).....	149
TABLA 43. Valores de HdC y Ee asignados a unidad declarada (módulos A1, A2 y A3).....	151

---

TABLA 44. Valores de HdC y Ee del proceso de fabricación innovador (módulos A1, A2 y A3).....	155
TABLA 45. Valores de HdC y Ee asignados a unidad declarada (módulos A1, A2 y A3).....	156
TABLA 46. Comparativa de valores de HdC y Ee obtenidos.....	157
TABLA 47. Ubicación de las empresas cerámicas del área metropolitana de Cúcuta.....	159
TABLA 48. Producto terminado (t/mes) y consumo de carbón (t/mes).....	159
TABLA 49. Productos fabricados (t/mes) y consumo de carbón (t/mes).....	160
TABLA 50. Resumen de ahorro usando el nutriente tecnológico.....	162







## PREFACIO

Quiero empezar el preámbulo de este libro, al que agradezco la invitación de prologar al Dr. Jorge Sánchez Molina, con esta reflexión de Primo Levi en *La ricerca delle radici*:

“¿Cuánto les deben nuestras raíces a los libros que hemos leído? Todo, mucho o nada: según el ambiente en el que hayamos nacido, la temperatura de nuestra sangre, el laberinto que la muerte nos ha asignado”.

Una de las principales características que nos caracteriza como especie humana es la de tener capacidad de aprendizaje permanente, un aprendizaje que nos ha servido para evolucionar en todos los aspectos de nuestra sociedad. En este sentido, los estudiosos de la ciencia y el saber han considerado que el instrumento por excelencia para conocer mejor cómo será el futuro tiene como su base el estudio de los fenómenos naturales, de comportamiento y de los elementos del universo. Entre los grandes pensadores, Aristóteles marca un hito en la historia de la ciencia griega por ser el último de su época que formuló un sistema del mundo en su conjunto, siendo a la vez el primero en embarcarse en investigaciones empíricas extensas.

La historia nos demuestra que se necesitan personas con esta filosofía de trabajo, comprometidas con su tierra, creadoras de redes de cooperación entre los distintos actores de la sociedad, empresas, universidad, administraciones públicas y entidades sociales para que se generen ideas y proyectos que tengan como

objetivo mejorar el presente y crear un mejor futuro para su ciudadanía. Dentro de este tipo de personas se puede encuadrar al profesor Jorge Sánchez Molina, que siempre se consideró “aristotélico” al creer que el nuevo aprendizaje debe basarse en la investigación, pero que esa investigación tenga como base filosófica la que nos dejó el gran Aristóteles, que promulgaba que el conocimiento debe de tener aplicación en la sociedad para procurar que esta sea lo más sostenible y cohesionadora posible.

En este sentido, desde hace más de 30 años ha dedicado su esfuerzo personal, profesional y académico al sector de la cerámica, consiguiendo hitos importantes que han contribuido de forma significativa a incrementar la generación de riqueza y valor compartido de este ámbito productivo en su querida Cúcuta y, por supuesto, en Colombia. Además, este trabajo cuenta con importantes aportaciones dentro del nuevo paradigma de lo que se denomina economía circular, un cambio de modelo productivo que conlleva a que los procesos de producción se hagan de distinta forma a la del modelo de economía lineal y que implica significativos cambios en todos los sectores productivos. Estoy seguro de que los lectores agradecerán entender los conceptos de nutrientes tecnológicos y utilizarán las referencias de este libro para plantear futuras investigaciones.

En este proceso permanente de aprendizaje e innovación, el profesor Sánchez decidió hacer la tesis doctoral en la Escuela Politécnica de Linares de España, un importante centro de docencia e investigación en materiales donde el Dr. Francisco Corpas Iglesias dirige el prestigioso grupo de investigación TEP-222 y el programa de doctorado en materiales que ha sido fundamental para generar el conocimiento de su tesis doctoral, lo que demuestra la importancia de creación de redes internacionales de investigación y cooperación universitaria y fortalecer la transmisión de los resultados de esta al sector productivo. A su vez, resalto el aporte de la ingeniera Diana Álvarez Rozo en la presente investigación, en quien confío germine la semilla del estudio de los nutrientes tecnológicos.

Quiero terminar con algunas reflexiones para el Dr. Jorge y, si me permiten, para todos los lectores. La primera es que nunca pierda su interés en la generación del conocimiento. Creo que la mejor forma de querer a su tierra y a su pueblo es innovar y transmitir el conocimiento para solucionar los retos que nos exige la sociedad a la que nos debemos. La segunda es que transmita a sus alumnos y colegas de la comunidad universitaria que, cuando se tienen convicciones y sueños, estos deben llevarse a cabo, como él ha demostrado, no solo para cumplir el destino vital personal sino lo más importante para mí, y como diría el emperador Marco Aurelio: devolver a la sociedad lo que ella nos ha dado a los que tenemos la suerte y el privilegio de enseñar e investigar para cambiar los paradigmas y seguir construyendo el futuro de nuestra especie.

La historia de la civilización la han construido personas que han creído en la investigación. Siempre se ha querido conocer, tener la certeza de lo que pasará en el futuro: cómo será este, cómo se adaptará la humanidad a este, qué retos tendremos que superar, qué actuaciones deberemos de llevar a cabo para ello, etc.

En Granada a 25 de agosto de 2018.

**Valentín Molina Moreno**

Docente del Departamento de Organización Empresarial

Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales

Universidad de Granada



# RESUMEN

El trabajo de investigación desarrollado está enmarcado dentro de la estrategia de la economía circular, es decir, la reducción tanto de la entrada de materiales como de la generación de desechos de un proceso antrópico. En este caso particular, la estrategia se ha querido aplicar al sector cerámico que converge en la zona metropolitana de Cúcuta, Colombia.

El proceso experimental fue propuesto a fin de establecer la viabilidad de sustituir parte de la fracción mineral usada en la actualidad (material arcilloso) por residuos provenientes de otros sectores económicos de la región: específicamente, residuos agroindustriales como el cisco de café y la cascarilla de arroz y residuos de procesos de combustión (cenizas) de carbón mineral en termoeléctrica y de los mismos hornos empleados para la cocción de los productos cerámicos en la región (horno colmena). Todas las materias primas fueron caracterizadas mediante el uso de técnicas como la difracción de rayos X (DRX), la fluorescencia de rayos X (FRX), la microscopía electrónica de barrido (MEB), el análisis termogravimétrico (TG) y la calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Los cerámicos elaborados fueron producidos a escala de laboratorio utilizando el conformado por extrusión como técnica de moldeo. Varias pastas cerámicas fueron usadas a partir de la modificación del contenido de residuo en la pasta, y la concentración másica del residuo estuvo entre el 5% y el 20%. En el caso de las cascarilla de arroz se incluyó una variable adicional, que fue el tamaño de grano

del residuo (pasante malla —Tyler— 16, 80 y 200). El proceso de cocción fue realizado en atmósfera oxidante haciendo uso de un horno con calentamiento por resistencia eléctrica. Se emplearon diferentes temperaturas de cocción (entre 900 °C y 1.200 °C) a fin de evidenciar la influencia de esta variable en las propiedades tecnológicas (contracciones de cocción, porcentaje de absorción de agua, resistencia mecánica a la flexión y resistencia a la abrasión profunda de probetas no esmaltadas) de los cerámicos obtenidos.

Los análisis físico-cerámicos dejaron en evidencia que concentraciones superiores al 10% no favorecen la obtención de cerámicos que cumplan los requisitos mínimos reportados en la literatura en cuanto a resistencia mecánica del material, incluso en altas temperaturas. Los mejores resultados fueron obtenidos con la ceniza de la central termoeléctrica y con el cisco de café. Se realizó una caracterización de los cerámicos mediante DRX y MEB, así como mediciones de conductividad térmica, a fin de explicar el comportamiento obtenido en las propiedades tecnológicas evaluadas, permitiendo así tener una correlación con la microestructura del material a medida que se incrementa la temperatura de cocción.

Por otra parte, análisis de flujo de calor (DSC) demuestran que el proceso de sustitución de arcilla por los residuos propuestos permite un aporte energético al sistema debido a la oxidación de la materia orgánica presente en todos los materiales sustitutos. Además, la modificación del agua físicamente absorbida en la pasta cerámica conformada y la reducción del contenido de caolinita (específicamente en la deshidroxilación de esta fase cerca de los 500 °C) conllevan a reducir el requerimiento de energía en el horno. De igual forma, efectos de disminución de la conductividad térmica del cerámico y otras variables analizadas permiten inferir el potencial de estos cerámicos para disminuir el consumo energético una vez puestos en obra.



## ABSTRACT



The research work developed is framed within the strategy of the circular economy, this is the reduction of both the entry of materials and the generation of waste from an anthropic process. In this particular case, the strategy has been applied to the ceramic sector that converges in the metropolitan area of Cúcuta, Colombia.

The experimental process was proposed in order to establish the feasibility of replacing part of the mineral fraction currently used (clay material) with waste coming from other economic sectors of the region, specifically agro-industrial waste such as coffee and rice husk, and residues of combustion processes (ashes) of coal in thermoelectric power plant and of the same kilns used for the firing of ceramic products in the region (Colmena kiln). All the raw materials were characterized by the use of techniques such as X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscopy (SEM), thermogravimetric analysis (TG) and differential scanning calorimetry (DSC).

The elaborated ceramics were produced on a laboratory scale, using extrusion forming as molding technique. Several ceramic pastes were obtained from the modification of the residue content in the paste, the mass concentration of the residue was between 5% and 20%. In the case of rice husks, an additional variable was included, it was the grain size of the residue (material that crosses the mesh (Tyler) 16, 80 and 200). The firing process was carried out in an oxidizing atmosphere using a kiln with heating by electrical resistance. Different firing



temperatures were used (between 900 ° C and 1200 ° C) in order to demonstrate the influence of this variable on the technological properties (firing shrinkage, percentage of water absorption, mechanical resistance to bending and resistance to abrasion deep of unglazed specimens) of the ceramics obtained.

The physical-ceramic analysis showed that concentrations higher than 10% do not favor the obtaining of ceramics that meet the minimum requirements reported in the literature in terms of mechanical strength of the material, even at high temperatures. The best results were obtained with the ash from the thermoelectric power plant and with the coffee husk. Characterization of the ceramics by means of XRD and SEM as well as measurements of thermal conductivity were carried out in order to explain the behavior obtained in the evaluated technological properties, thus allowing to have a correlation with the microstructure of the material as the firing temperature increases.

Analysis of heat flow (DSC), show that the process of substitution of clay by the proposed waste allows an energy contribution to the system, due to the oxidation of the organic matter present in all substitute materials, it also allows the modification of physically absorbed water in the shaped ceramic paste and the reduction of the kaolinite content (specifically in the dehydroxylation of this phase close to 500 ° C) lead to reduce the energy requirement in the kiln. In the same way, effects of decrease of the thermal conductivity of the ceramic and other analyzed variables allow to infer the potential of these ceramics to reduce the energy consumption once installed in the building.

# INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se viene tomando conciencia sobre la importancia de la protección del medio ambiente. Así, el calentamiento global y la alta generación de desperdicios de la actividad industrial/comercial son motivo de comentarios en el día a día de las personas (Panwar, Kaushik & Kothari, 2011; Zhang & Wen, 2008; Segerson & Miceli, 1998; O'Neill & Oppenheimer, 2002).

A nivel industrial, temas como el desarrollo sostenible y la economía circular han venido ganando interés, no solo por el hecho de realizar una producción más limpia, sino por las ventajas comerciales que pueden surgir a partir de su implementación, como en el caso de las etiquetas verdes, que son vistas con buenos ojos por los consumidores (Castells & Cadavid, 2011; Andersen, 2007; Tukker, 2015).

La industria cerámica es un sector que consume gran cantidad de energía para la elaboración de los productos cerámicos de construcción. Por ende, es también un gran generador de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono, el cual se origina debido a la oxidación de combustibles en los hornos durante el proceso de cocción (Tikul & Srichandr, 2010; Bovea et al., 2010).

El sector cerámico tradicional no ha sido ajeno a la tendencia de la economía circular y el desarrollo sostenible. La utilización de residuos orgánicos e inorgánicos en sustitución de arcillas en la pasta cerámica y el uso de biomasa como fuente de

energía para los hornos cerámicos son algunas de las posibilidades que se han evidenciado en la literatura, especialmente en territorio español, país considerado uno de los mayores productores de materiales cerámicos de construcción (Zhang, 2013; Madurwar, Ralegaonkar & Mandavgne, 2013; Boltakova et al., 2016).

Estos residuos utilizados como materia prima en sustitución de los componentes tradicionales son reconocidos dentro del campo de la economía circular como “nutrientes tecnológicos” (Castells & Cadavid, 2011). Residuos de minería y metalúrgicos, vidrio doméstico, lodos, cenizas y residuos agroindustriales han sido usados como nutrientes tecnológicos para la fabricación de materiales cerámicos de construcción, con propiedades tecnológicas similares a las obtenidas con las materias primas tradicionales (Zhang, 2013; Madurwar, Ralegaonkar & Mandavgne, 2013; Boltakova et al., 2016).

Aunque se han obtenido buenos resultados desde el punto de vista práctico (en relación con las propiedades físico-cerámicas del material cocido) (Zhang, 2013; Madurwar, Ralegaonkar & Mandavgne, 2013; Boltakova et al., 2016), se ha podido evidenciar en la literatura deficiencia de conocimiento que permita explicar el porqué del comportamiento de las propiedades obtenidas en el cerámico cuando se adicionan nutrientes tecnológicos a la pasta o si se utilizan diferentes tipos de conformado (extrusión o prensado).

En el presente trabajo de investigación se ha querido profundizar en este aspecto expuesto mediante la utilización de materias primas y nutrientes tecnológicos abundantes en el área metropolitana de Cúcuta (cascarilla de arroz, cisco de café, cenizas volantes de termoeléctrica e inquemados de carbón de los hornos colmena de la industria cerámica regional), empleando la extrusión como técnica para el conformado de las piezas cerámicas.

Inicialmente, se presentan los objetivos propuestos para el desarrollo de la investigación. Seguidamente, se presenta el marco de referencia de la investigación, el cual permite al lector poder reconocer con mayor claridad el entorno en que se ha desarrollado la investigación. Aspectos como el reconocimiento del estado del arte del tema de investigación, la problemática establecida, la hipótesis de la investigación y la metodología usada para dar cumplimiento a los objetivos son presentados en este apartado.

Los resultados se han presentado de manera secuencial. Inicialmente, se hace una descripción y caracterización de las materias primas usadas en el presente trabajo, mediante las técnicas de Difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), análisis termogravimétrico (ATG), calorimetría diferencial de barrido (DSC) y microscopia electrónica de barrido (MEB).

Posteriormente, se presentan los resultados de caracterización físico-cerámica para todas las pastas formuladas en la descripción metodológica. La influencia de

la concentración y el tamaño de grano del nutriente son evaluados en relación con su efecto sobre las propiedades de resistencia mecánica a la flexión, el porcentaje de absorción de agua y la contracción lineal de secado y de cocción. La temperatura de cocción se ha realizado entre 950 °C y 1.200 °C.

El nutriente que presentó el mejor comportamiento en el apartado anterior ha sido usado para establecer correlaciones entre las propiedades físico-cerámicas obtenidas (adicionando la conductividad térmica a las propiedades anteriormente estudiadas) y su composición estructural, así como con los principales aspectos morfológicos del material cocido mediante el uso de microscopía electrónica de barrido.

Para finalizar los resultados, se presenta un análisis de los aportes de tipo energético/ambiental del nutriente tecnológico sobre el proceso de fabricación de materiales cerámicos de construcción en el área metropolitana de Cúcuta, usando para ello la técnica ATG/DSC.



## CAPÍTULO I

# INCORPORACIÓN DE LOS NUTRIENTES TECNOLÓGICOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA DEL ÁREA METROPOLITANA DE CÚCUTA

## **1. La industria cerámica del área metropolitana de Cúcuta**

Las principales arcillas explotadas en el departamento de Norte de Santander se encuentran en el área metropolitana de Cúcuta, la cual cuenta con una superficie de 2.196 km<sup>2</sup>, que ocupa el 10,1% de la extensión departamental. De todo el departamento, la zona metropolitana de Cúcuta es el área donde mayoritariamente se encuentran yacimientos arcillosos, además de ser el lugar donde se concentra casi la totalidad de la industria dedicada a la explotación y transformación de este material. “En vecindades de la ciudad de Cúcuta se explotan las arcillas estratificadas de la parte superior del Grupo Guayabo y la Formación León, de edad Neógena, de origen continental (Ngc) y de excelente calidad como un gres típico” (Sánchez, 2014).

Estas arcillas se encuentran formando parte de la litología de las formaciones terciarias de León y Guayabo. En algunos sectores de Cúcuta los estudios sobre la composición mineralógica y química de las arcillas de Cúcuta las muestran como materiales de primera calidad, desde el punto de vista cerámico (Pedroza, 1996).

El sector está representado por 49 empresas legalmente establecidas en el sector de la arcilla y la cerámica ubicadas en el área metropolitana de Cúcuta (Díaz, 2015). Estas se pueden clasificar con base en su producción según lo establecido en la

Ley 905 de 2004 de la siguiente manera: un 59% son pequeñas empresas, un 20% son microempresas, un 16% corresponde a medianas, y el 5% restante pertenece a grandes empresas; es decir, solo Cerámica Italia clasifica como gran empresa, y en las microempresas y pequeñas empresas clasifican los artesanos y los chircales. Geográficamente, las empresas legalmente constituidas están distribuidas en un 28,57% en San José de Cúcuta, 20,41% en Villa del Rosario, 30,61% en El Zulia y el 20,41% en Los Patios (Díaz, 2015).

Todas las empresas anteriormente mencionadas se dedican a la fabricación de materiales de la construcción, dentro de los cuales se destacan: tableta vitrificada, tableta esmaltada, tejas, tejas rústicas hechas a mano, bloques, ladrillos, tabelón, productos artesanales (decorados y enchapes), entre otros. Esto las convierte en una de las principales alternativas de desarrollo para la región; por ello, es de gran importancia mejorar constantemente la calidad de los productos ofertados, con el fin de alcanzar la competitividad necesaria para mantenerse en los mercados actuales e incursionar en otros a nivel internacional (Sánchez & Ramírez, 2013).

### **1.1 Distribución geográfica de las industrias cerámicas**

- Municipio de Cúcuta (Sánchez, 2014). Está localizado sobre las estribaciones de la cordillera Oriental, en el macizo de Santander. Se ubica al este del departamento Norte de Santander, en límites con la República de Venezuela. El municipio de Cúcuta tiene una extensión de 1.119 km<sup>2</sup>, que equivalen al 4,11% de la superficie departamental (27.217 km<sup>2</sup>), ocupando el séptimo lugar por superficie entre los municipios del departamento.

Las principales plantas de cerámicas, tejares y ladrilleras de Cúcuta son:

- Tejar de Pescadero.
  - Arcillas del Oriente.
  - Ladrillera Casablanca S.A.S.
  - Tejar San Gerardo Ltda.
  - Ladrillera Arcigres Ltda.
  - Tejar Santa Rosa Ltda.
  - Ladrillera Colbee S.A.S.
  - Tejar Santa Teresa.
- Municipio del Zulia (Sánchez, 2014). Tiene una superficie de 48.979 ha, equivalente al 0,22% del área total de Norte de Santander, y está situado en la subregión oriental del departamento. El municipio del Zulia limita: al norte con el municipio de Cúcuta, al sur con los municipios de San Cayetano y Santiago, por el oriente con el municipio de Cúcuta y por el occidente con los municipios de Gramalote y Sardinata.

El plan de ordenamiento territorial del municipio de El Zulia presenta la siguiente información en el tema de la arcilla: en la actualidad no se tienen cuantificadas las reservas de arcillas existentes en el municipio; sin embargo, de acuerdo con el porcentaje de distribución de las formaciones portadoras en

el área territorial (15,4% para las formaciones León y Guayabo), se estima que los volúmenes de material son importantes.

Los principales tejares y ladrilleras de El Zulia son:

- Arcillas Castilla.
  - Ladrillera Merkgres de Colombia Ltda.
  - Tejar Santa María Ltda.
  - Ladrillera El Pomar.
  - Cerámica Murano.
  - Ladrillera Arcigres Ltda.
  - Arcillas Zuligres.
- Municipio de Villa del Rosario. Se encuentra situado en la parte noreste de Norte de Santander y tiene una extensión de 228 km<sup>2</sup>. Los límites generales son: al norte con el municipio de San José de Cúcuta, al oriente con el río Táchira, al sur con el municipio de Ragonvalia, y al occidente con el municipio de Los Patios.
  - Las principales ladrilleras de este municipio son:
    - Ladrillera Cúcuta.
    - Margres S.A.
    - Ladrillera Norsan Ltda.
    - Ladrillera Patiño.
    - Tejar Cerámica Babilonia.
    - Arcillas San Felipe Ltda.
    - Ladrillera el Topacio.
    - Arcillas del Rosario.

Estratificuramente, se observan en el área estratos pertenecientes a la unidad litoestratífuga del Terciario, denominada Formación Guayabo (Tmg), conjunto arcilloso, la cual consta principalmente de estratos arcillosos de espesor variable interestratificados con rocas areniscas de dureza media y grano medio cementadas en óxido de hierro.

- Municipio Los Patios (Sánchez, 2014). Está localizado al oriente de Norte de Santander, haciendo parte de la subregión oriental del departamento, junto con los municipios de Cúcuta, El Zulia, San Cayetano, Villa del Rosario y Puerto Santander, los cuales, excepto el último, conforman el área metropolitana de Cúcuta.

El plan de ordenamiento territorial del municipio de Los Patios presenta la siguiente información en el tema de la arcilla: las arcillas que se extraen en el municipio de Los Patios son reconocidas a escala nacional por su excelente calidad en la elaboración de productos cerámicos, esmaltados y no esmaltados. Así mismo, el procesamiento de las arcillas tiene marcada incidencia en la vida económica de la comunidad, con un alto índice de empleo a través de la industria mecanizada y artesanal; esto debido a las características físico-químicas de estos materiales, óptima para la elaboración de productos cerámicos.



Las principales unidades productivas se encuentran ubicadas sobre la carretera que de Cúcuta conduce al municipio de Pamplona, en el sector denominado Los Vados, a 5 km de la ciudad de Cúcuta, en el nororiente del departamento. Entre las principales ladrilleras de este municipio se encuentran:

- Cerámica Támesis S.A.
- Cerámica La Española.
- Ladrillera Sigma Ltda.
- Tejar Los Vados.
- Cerámicas América.

Los terrenos evaluados en este municipio hacen parte de un área ampliamente reconocida por la calidad de las arcillas existente en su corteza terrestre y perteneciente principalmente al Grupo Guayabo.

- Municipio de San Cayetano (Sánchez, 2014). Este municipio está situado en la subregión oriental del departamento, en el área metropolitana y en la zona de influencia fronteriza con la República de Venezuela. El municipio tiene una superficie de 14.198 ha, equivalente al 0,06% del área total de Norte de Santander. Limita por el norte con el municipio de El Zulia, al oriente con el municipio de Santiago, al sur con los municipios de Bochalema y Durania, y al occidente con el municipio de Cúcuta.

El plan de ordenamiento territorial del municipio de San Cayetano presenta la siguiente información en el tema de la arcilla: en la actualidad no se tienen cuantificadas las reservas de arcillas existentes en el municipio. Sin embargo, de acuerdo con el porcentaje de distribución de las formaciones portadoras en el área territorial (35,3% para las formaciones León y Guayabo), se estima que los volúmenes de material son importantes.

Las principales ladrilleras de este municipio son:

- » Cerámica Andina Ltda.
- » Arcillas los Ángeles Ltda.
- » Ladrillera Mejía & Mora Cía. Ltda.
- » Chircal el Zafiro.
- » Tejar La Esperanza de María.

## **2. Economía circular**

### ***2.1 Generación de residuos industriales y el rol de la economía circular***

Los sistemas industriales modernos del siglo XX se fundamentaban en energía generada por carbón, excesiva explotación y consumo no sostenible de los

recursos naturales, y producción de enormes cantidades de residuos, lo que genera graves incidencias en indicadores ambientales tales como cambio climático, acidificación de los océanos, disminución de la biodiversidad, ciclo inestable del nitrógeno, tierras áridas y ríos contaminados (Schell, 2016). Además, estos sistemas convergen en graves problemas sociales y económicos, pues los residuos, considerados generalmente de bajo valor, suelen permanecer en los sitios de producción o extracción sin generar ninguna ventaja económica o social, y en otros casos su disposición se da en ríos, tierra y aire, o en zonas de población pobre.

De estos argumentos emergen proyectos sostenibles que buscan revertir o minimizar el impacto ambiental generado por la industrialización y transformar la huella ecológica actual en activos valiosos. Se busca que tales activos sean capaces de ofrecer importantes beneficios económicos y sociales al reducir las emisiones de GEI, disminuir la generación de residuos e incluirlos dentro de procesos industriales de los distintos sectores productivos, convirtiéndolos en ecosistemas de valor, lo que adicionalmente incrementa el valor de los productos y permite nuevas oportunidades de crecimiento económico y empleo (Illic & Nikolic, 2016; European Environment Agency, 2016). En este sentido, la economía circular será una realidad cada día más presente, impulsando a los sectores productivos, el Gobierno y la sociedad en general a plantearse alternativas que promuevan la conservación del medio ambiente y afrontar la escasez de recursos productivos y energéticos (Lieder & Rashid, 2016).

Existen varias definiciones de lo que es la economía circular (Steffen et al., 2015; Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016; Ellen Macarthur Foundation, 2013). Sin embargo, esta es, en esencia, una alternativa al modelo económico lineal, no sostenible, en el que se supone que los recursos naturales están disponibles, abundantes, fáciles de proveer y desechar. La economía circular plantea minimizar la necesidad de nuevos insumos de materiales y energía, así como los efectos ambientales generados por la extracción de recursos, las emisiones y los residuos, gestionando los recursos naturales de manera eficiente y sostenible a lo largo de su ciclo de vida (transformando los desechos en un recurso). Por tanto, su creación requiere cambios fundamentales en toda la cadena de valor, desde el diseño y la tecnología de los productos hasta los nuevos modelos de negocio (European Environment Agency, 2016).

## ***2.2 Principios y aplicación de la economía circular***

EL modelo de economía circular les otorga valor a los residuos, sin importar si son de naturaleza orgánica o tecnológica, sustentándose en la reutilización inteligente de estos en un modelo cíclico, convirtiéndolos en materia prima para la fabricación de nuevos productos tecnológicos (Lett, 2014). Este nuevo modelo ha

ido llamando la atención alrededor del mundo en la última década, de manera que se encuentran revisiones, publicaciones y casos de estudio al respecto (Yap, 2005; Fang, Côté & Qin, 2006; Preston, 2012; Su et al., 2013; Lett, 2014; Naustdalslid, 2014; Abu-Ghunmi et al., 2016; Shen & Qi, 2012), especialmente en China, país que parece estar comprometido con su implementación (Xinan & Yanfu, 2011).

La economía circular surge principalmente en la literatura a través de dos principios, llamados 3R (Reducir, Reutilizar y Reciclar) (Wua et al., 2014) y 6R (Reutilizar, Reciclar, Rediseñar, Remanufacturar, Reducir y Recuperar) (Jawahir & Bradley, 2016; Geissdoerfer et al., 2017; Winans, Kendall & Deng, 2017). Con base en las diferentes contribuciones teóricas, los principios de la economía circular pueden definirse así:

- Reducir el uso de materias primas, energía, materiales y otros recursos durante la fabricación, las emisiones y la generación de residuos.
- Reutilizar productos finales, o de sus componentes, después de su primer ciclo de vida, en la fabricación de nuevos productos y componentes, con el fin de reducir el uso de materiales vírgenes.
- Reciclar se refiere el proceso de convertir residuos en nuevos materiales o productos.
- Recuperar implica la recolección de productos al final de la etapa de uso, desmontaje, clasificación y limpieza para su utilización en ciclos de vida posteriores del producto.
- Rediseñar implica el diseño de nuevos productos que utilizarían componentes, materiales y recursos recuperados de un ciclo de vida anterior.
- Remanufacturar implica restaurar productos a su estado original o similar a través de la reutilización de tantas partes como sea posible sin que este pierda su funcionalidad.

De lo anterior se puede deducir que la economía circular permite ofrecer productos fabricados con menos recursos, utilizando materiales reciclados, ya sea por el rediseño de productos basados en mejoras incrementales a los productos existentes, o por el diseño de nuevos productos eficientes en recursos que pueden ser reparados, mejorados y reciclados (European Environment Agency, 2016).

### **2.3 La economía circular en la industria manufacturera**

Como resultado de la producción masiva de bienes con alta disponibilidad y bajo costo, soportada por una sociedad consumista, se generan grandes emisiones al medio ambiente y cantidades muy significativas de residuos sólidos. Además, debido al crecimiento de la población mundial y la expansión de los mercados,

se prevé el aumento en la demanda de los recursos naturales, que no podrá ser satisfecha debido a que los recursos del planeta son limitados (Lieder & Rashid, 2016; European Commission, 2014). Por tal motivo, la industria manufacturera no solo enfrenta actualmente la presión de regulaciones ambientales, sino que encuentra riesgos en su posicionamiento por el suministro de recursos, amenazado por la competencia entre industrias (De los Ríos & Charnley, 2016). Tal como lo expone la literatura (Illic & Nikolic, 2016; Lieder & Rashid, 2016; Esmaeilian, Behdad & Wang, 2016), la economía circular se considera una solución para armonizar estas necesidades de crecimiento económico y protección del medio ambiente.

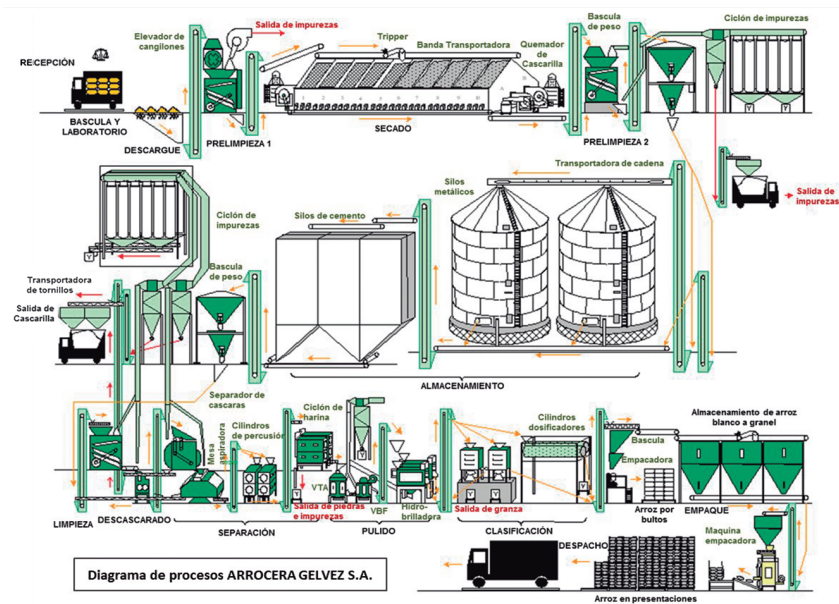
#### ***2.4 Nutrientes tecnológicos en la industria cerámica***

Algunos de los proyectos propuestos por varios autores, especialmente dentro del principio del Reciclaje, plantean la creación de zonas especiales de almacenamiento de residuos, para que estos sean recirculados y usados como aditivos para la fabricación de nuevos productos en lugar de usar materias primas naturales, considerándolos como nutrientes tecnológicos (McDonough et al., 2003). Residuos como cenizas de incinerador de biomasa (Pérez et al., 2012b), residuos maderables (Eliche et al., 2012), tierra blanqueada de la industria del petróleo (Eliche & Corpas, 2014), lodos de aguas residuales urbanas (Teixeira et al., 2011), bagazo de caña de azúcar, lodos de la industria cervecera, aguas residuales del molino de aceituna, residuo de café molido (Eliche et al., 2011), cenizas de cisco de café (Acchar & Dultra, 2015), cascarilla de arroz (Soltani et al., 2015), ceniza de la cascarilla de arroz (Guzmán et al., 2013a; Guzmán et al., 2013b), residuos de la industria del papel (Martínez, Cotes & Corpas, 2012), residuos de producción de biodiésel (Eliche et al., 2012), lodo rojo derivado de la industria del aluminio (Pérez et al., 2012a), cenizas volantes de la combustión del carbón (Ahmaruzzaman, 2010; Cultrone & Sebastián, 2009), entre otros, han sido utilizados para la fabricación de nuevos materiales cerámicos, con el fin de aprovechar dichos residuos y/o modificar propiedades físicas y/o mecánicas.

### 3. Procesos industriales de donde se generan los nutrientes tecnológicos empleados

#### 3.1 Proceso productivo del arroz

Figura 1. Diagrama de procesos de una arrocera (Burgos, 2011)



Inicia con el ingreso del vehículo cargado con arroz paddy proveniente de los cultivos. Se toman muestras directamente del vehículo para establecer la existencia o no de grano ambarino (dañados por el calor) mediante la limpieza, descascarado y pulido de la muestra en laboratorio. Antes de proceder con el descargue del vehículo se realizan análisis de humedad e impurezas, con lo que se valoriza el arroz. Una vez aceptado el arroz, se descarga en las tolvas de recibo y es dirigido por medio de bandas transportadoras y elevadores de cangilones al proceso de prelimpieza, donde se retiran impurezas como: pedazos de palos, tallos, hojas, espigas, semillas de otras plantas, terrones, piedras, etc., que son posteriormente desechados.

El arroz prelimpiado se lleva por medio del elevador de cangilones al triper, el cual lo deposita en los silos de secado, donde se apila en capas de 70-90 cm de alto sobre mallas perforadas que permitan el paso forzado de aire caliente a 35-40 °C durante 24 a 30 horas. Este proceso garantiza rendimiento del arroz en el proceso de trillado y la calidad del producto final, por lo que deben realizarse pruebas de humedad constantemente a partir de las 12 horas de secado, hasta lograr una humedad de 12-16%. El arroz seco se descarga y, por medio de bandas

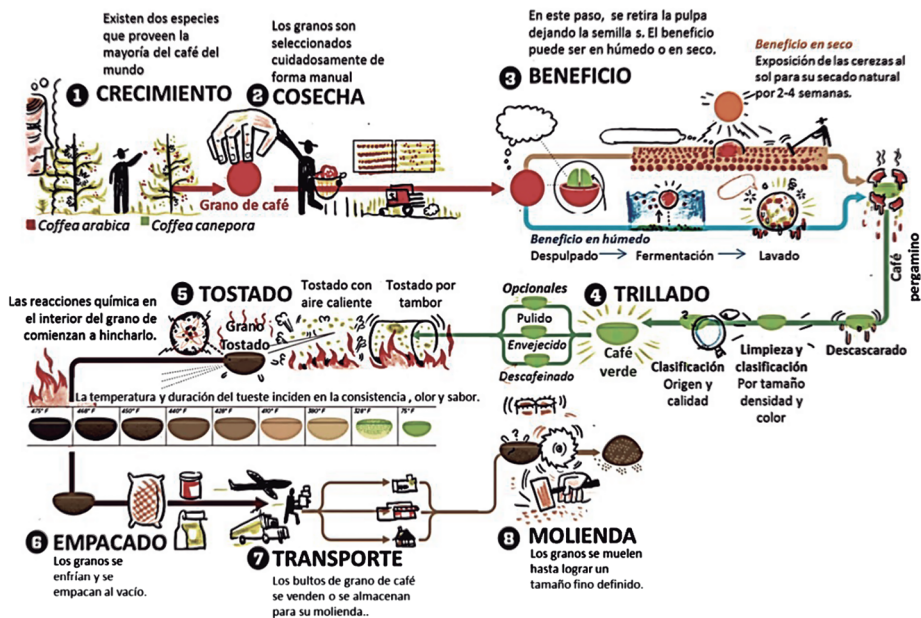
transportadoras y elevadores de cangilones, se almacena en silos (Leal, 2012; Contreras, 2008).

De acuerdo a las necesidades de producción, el arroz seco almacenado pasa al proceso de trillado, iniciando con el descascarado por medio de rodillos que giran a gran velocidad. Del efecto del choque del arroz seco con los rodillos se obtienen dos subproductos: la cascarilla de arroz y el arroz integral. El arroz proveniente de la descascaradora pasa a una aventadora que separa el grano de la cascarilla, la cual es atrapada por ciclones y conducida por tuberías hacia silos de almacenamiento, de donde posteriormente se realiza el descargue para su venta. Los granos obtenidos son una mezcla de arroz paddy y arroz integral, los cuales se separan por densidad en una mesa densimétrica, de donde los granos integrales pasan al proceso de blanqueamiento, mientras que los granos de paddy (con cáscara) regresan al proceso de descascarado y las porciones de mezcla retornan al proceso de separación (Leal, 2012; Contreras, 2008).

En el proceso de blanqueamiento se remueve el salvado del grano de arroz. De este modo se obtiene el arroz blanco entero y partido y, como subproducto, la harina de pulimento. La blancura del grano se define en el proceso de pulimento, donde se fricciona el arroz (sin salvado) con piedras en pulidores verticales VTA y se rocía con agua en polichadores verticales VBF. Posteriormente es separado y clasificado como: arroz entero, arroz partido (granza) y harina de arroz (durante este proceso también se eliminan impurezas o granos de arroz defectuosos). Finalmente, el arroz se empaca según los requerimientos del mercado (Leal, 2012; Contreras, 2008).

### 3.2 Proceso productivo del café

Figura 2. Proceso productivo del café (Greenberg, 2014)



Las prácticas de poscosecha, conocidas en muchos lugares como beneficio y secado, varían de acuerdo con el país, el tipo de cultivo y la especie de café. En todo caso, transforman la cereza en un producto seco (separando el mesocarpio y el endocarpio), listo para el proceso de trilla. El beneficio puede ser en húmedo o en seco; el primero consiste en la exposición de las cerezas al sol durante varios días hasta alcanzar cierto grado de humedad, mientras que el segundo incluye: el despulpado, la fermentación, donde se retira el mucilago, el lavado del grano para retirar totalmente el mucilago y el secado del grano al sol o en secadores mecánicos. Para ambos métodos, al resultado del café seco se le denomina café pergamino (Café de Colombia, s.f.).

El café pergamino, almacenado en bultos de fique, se recibe en planta y se le verifica por inspección visual su color, aroma, uniformidad, tamaño y color; además de algunos análisis de laboratorio para verificar su calidad (Martínez & Becerra, 2007). Posteriormente, se lleva por medio de elevadores de cangilones hacia el silo de almacenamiento, donde, dependiendo del programa de producción, se descarga al monitor de café para eliminar todo tipo de impurezas resultado del beneficio, almacenamiento y transporte, y proceder con el proceso de trillado (Pinzón, 2008). En la máquina de trillado se elimina el pergamino o cisco para obtener el café almendra o café verde, al rozar el café pergamino con los rodillos del tambor (Martínez & Becerra, 2007). Los extractores de cisco se encuentran en



diversos puntos del proceso y transportan todo el cisco a un silo (Pinzón, 2008). El cisco constituye alrededor del 12% del peso del grano en base seca. Una vez trillado, el grano verde se selecciona y clasifica cuidadosamente, teniendo en cuenta su tamaño, peso, color y apariencia física (defectos) (Café de Colombia, s.f.; Pinzón, 2008).

El café verde o almendra es el insumo para la elaboración del café tostado en tostadores a base de gas o electricidad, que inicialmente secan el café verde a temperaturas entre 125-187 °C y luego lo tuestan hasta que este empieza a reventar a temperaturas superiores a 200°C, generando cambios físico-químicos que desarrollan el aroma y sabor del café (Café de Colombia, s.f.; Pinzón, 2008). El grado de tueste define el color, el aroma y el sabor del café, por lo que depende del tipo de producto que se vaya a obtener (Martínez & Becerra, 2007).

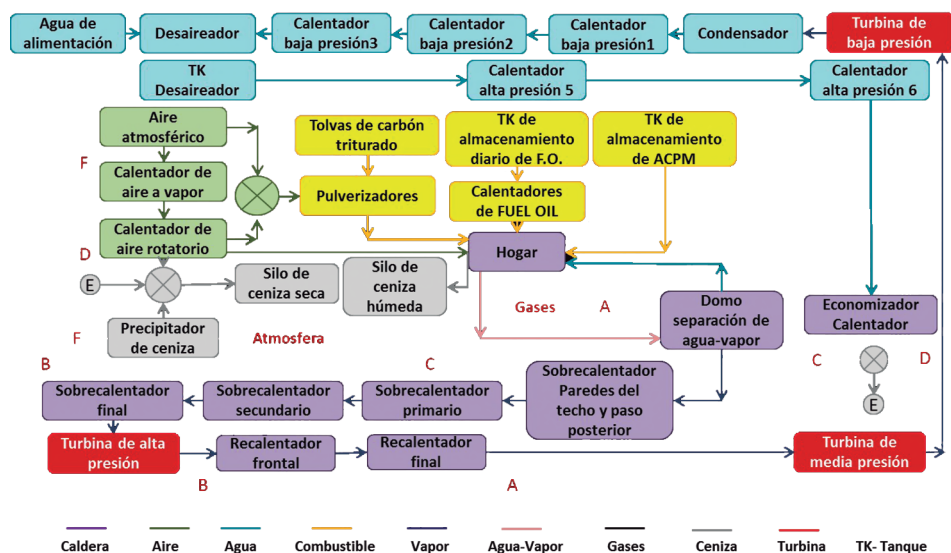
El café tostado se deja reposar por 20-30 min (Martínez & Becerra, 2007) o se enfría haciendo pasar una corriente de aire frío alrededor de los granos hasta alcanzar temperaturas por debajo de 150 °C min (Mejía & Montes, 2013), para pasarlo al proceso de molido, donde se reduce el tamaño del grano tostado hasta obtener un polvo fino, que será almacenado en silos desgasificadores para eliminar los gases que se generan en las anteriores etapas del proceso, lo que puede llevar entre 3 y 12 horas dependiendo de si el café está en movimiento o no (Pinzón, 2008). Por último, el café molido es empacado al vacío en bolsas de polipropileno biorientado metalizado para proteger al producto tanto de los factores ambientales, químicos o físicos como de la manipulación, el transporte y el almacenamiento (Martínez & Becerra, 2007; Mejía & Montes, 2013).

### ***3.3 Proceso productivo de la central termoeléctrica***

El proceso de producción de electricidad de la central termoeléctrica está representado en la figura 3 y se explica a continuación.



**Figura 3. Diagrama funcional del generador de vapor de la central termoeléctrica (López, Tarantino & Aranguren, 2010)**



El combustible primario de la central termoeléctrica es el carbón bituminoso, el cual es recibido en volquetas de 10 a 12 toneladas de capacidad neta y se almacena en un patio con área de 2,84 hectáreas (llegando a almacenar la cantidad suficiente que permita la operación continua hasta por 60 días). Posteriormente, es conducido mediante una cinta transportadora a través de alimentadores vibratorios hacia la cámara de triturado, donde en principio se remueven los residuos metálicos que pueda contener el carbón con un separador electromagnético, para ser triturado a tamaños inferiores de 20 mm, con el fin de aumentar la superficie de combustión y así mejorar la eficiencia de su combustión. Al salir de la cámara de trituración, el carbón se pasa por medio de bandas transportadoras hacia los alimentadores gravimétricos que suministran el carbón a los pulverizadores, y a su vez a los quemadores de la caldera, donde se mezcla con aire caliente ( $127 \text{ kg/cm}^2$  a  $538 \text{ }^\circ\text{C}$ ) para su combustión (Termotasajero S.A. E.S.P., 2008; Termotasajero S.A. E.S.P., s.f.; UNESA, s.f.).

La caldera está formada por numerosos tubos pertenecientes a los sistemas del tambor de vapor, hogar, sobrecalentadores, recalentador y economizador, por donde circula agua, que es convertida en vapor a alta temperatura. En el hogar de la caldera se disponen los ignitores o antorchas, quemadores de ACPM, quemadores de fuel oil y quemadores de carbón, los cuales en reacción con el aire crean un remolino de fuego. Las cenizas generadas por la combustión se manejan de dos formas: (1) la ceniza pesada cae al fondo del hogar de la caldera, y es transportada por bandas transportadoras a un silo que posee una tolva cónica en su parte inferior, por donde se descarga a volquetas para almacenarlas en el

patio de cenizas, y (2) la ceniza volante de los gases producidos por la combustión se deposita en tolvas que están debajo del economizador, los calentadores y los precipitadores electrostáticos, y son transportadas por alimentadores presurizados hasta el silo de almacenamiento, que cuenta con descargadores rotatorios, donde la ceniza se humedece con agua para evitar que se disperse en el ambiente en el trayecto hacia el patio de cenizas (Termotasajero S.A. E.S.P., 2008). Estas últimas reciben el nombre de cenizas volantes, siendo el subproducto mayoritario, con un porcentaje que varía entre 80-90% (Argiz, 2014).

El vapor de agua generado (495 toneladas/hora de vapor a 538 °C y 127 kg/cm<sup>2</sup>) entra a la turbina de alta presión y se recalienta para entrar a la turbina de presión media y posteriormente a la de presión baja, de donde sale a 42,5 °C y 63,4 mm Hg, y pasa finalmente al condensador, haciendo girar el eje de estas turbinas, que se mueve solidariamente con el rotor del generador eléctrico. Allí la energía mecánica rotatoria es convertida en electricidad de media tensión y alta intensidad, la cual es elevada al transformador y se envía a la red general de transmisión (subestaciones de Bucaramanga, Belén y San Mateo) mediante cables trenzados de aluminio endurecido (Termotasajero S.A. E.S.P., 2008).

El agua requerida para el enfriamiento y operación de la planta se toma del río Zulia mediante bombas de tornillos, las cuales envían el agua a un desarenador encargado de retirar las partículas en suspensión de tamaño superior a 0,12 mm. El agua desarenada pasa al tanque de carga, donde es succionada por bombas de circulación hacia la estación secundaria. Esta agua se usa para el enfriamiento del condensador, el sistema de enfriamiento, la planta de tratamiento de agua, el sistema contra incendio, el sistema de manejo de cenizas, el lavado de los tamices rotatorios y la lubricación de las bombas de agua de circulación (Termotasajero S.A. E.S.P., 2008).

### **3.4 Proceso de fabricación de productos cerámicos**

La fabricación de productos cerámicos parte de una serie de procesos que permiten aprovechar uno de los recursos naturales más abundantes e importantes de la región del Norte de Santander, como lo es la arcilla. Se realiza la transformación de este recurso natural en materiales de mampostería de gres que posteriormente se convertirán en insumos para el sector de la construcción a nivel regional, nacional e internacional (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016).

- **Materias primas:** A partir de la caracterización del material de los diferentes frentes de explotación de arcilla (figura 4), materia prima necesaria para el proceso de producción de materiales cerámicos y de gres, se realiza la mezcla apropiada de estos materiales arcillosos, según las características de color, textura y demás componentes físicos y mineralógicos. Así se obtiene el insumo principal para iniciar con el proceso de producción.

La mezcla necesaria de la materia prima incluye diferentes tipos de arcilla. Estas son almacenadas según sus características químicas en silos metálicos de almacenamiento con capacidades adecuadas para tener un stock de trabajo. Posteriormente, y luego de ser dosificadas por medio de tolvas básculas digitales en la medida exacta que se necesite, se realiza la mezcla de estas arcillas, que dan paso a una arcilla compuesta (pasta) adecuada para el posterior proceso de fabricación: trituración y molienda.

**Figura 4. Frente de explotación de la materia prima**



- **Trituración y molienda:** En esta etapa del proceso, y después de la recepción y almacenamiento de materias primas, el objetivo fundamental es disminuir el tamaño de partícula para su manejo en las etapas posteriores (figura 5). Por medio de un molino de martillos, se tritura la arcilla hasta un tamaño de grano lo suficientemente pequeño (hasta un aproximado de 2 mm o malla 10) para darle acabados superficiales al producto final. Se inicia con una tolva alimentadora, que es un silo metálico en forma de embudo que contiene una banda transportadora en su parte inferior, la cual transporta la arcilla contenida en el silo. Este equipo se encarga de almacenar/alimentar la arcilla mezclada en tamaños que van desde los 2 cm hasta los 15 cm de diámetro (en esta etapa se registra la cantidad de materia prima que se va a utilizar a lo largo de todo el proceso). Luego esta pasa por una banda transportadora que alimenta un triturador primario por medio de un rompeterrones (desintegrador de mandíbulas), que se encarga de bajar el tamaño hasta máximos de 2 cm. Seguidamente, viene un sistema de bandas transportadoras que alimentan los molinos con capacidades adecuadas para la producción, el cual baja el tamaño de partículas entre 1,5 y 2 mm. Por último, la arcilla ya molida se almacena en una serie de silos metálicos que posteriormente alimentarán al proceso de moldeo.

**Figura 5. Trituración y molienda de la materia prima (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)**

- **Humectación y moldeo:** Luego de ser triturada y molida la arcilla, se sigue con la preparación para darle la forma requerida según el producto que se desee producir. Se toma la arcilla del silo de almacenamiento del área de molienda y se hace llegar a una mezcladora o amasadora de doble eje, la cual le agrega un porcentaje de agua de forma manual (17% al 20% de agua) para brindarle maleabilidad y darle la forma requerida por medio de la extrusión. Luego de ser humectada y amasada (figura 6), se hace pasar la arcilla por medio de laminador. Con este equipo lo que se busca es darle una trituración final y preparar la arcilla humectada en forma de láminas para mejorar comportamiento en la extrusión. Finalmente, y después del laminado y por medio de una banda transportadora, pasa a extrusora por vacío, la cual le da forma final al producto requerido. Para ese fin, hace pasar la arcilla por medio de un tornillo que termina en un molde que da la forma al producto. Luego de extruido, se hace el corte del producto por medio de una cortadora automática que se programa según el tamaño requerido. Seguidamente, el material pasa por medio de un mecanismo automático que se encarga de apilarlo y transportarlo.

**Figura 6. Humectación y moldeo (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)**

- **Secado:** En esta etapa se recibe el producto con la forma requerida y con las condiciones de humedad dadas en la etapa de humectación. Esta humedad (contenido de agua en la arcilla) debe ser retirada para posteriormente pasar al proceso de cocción. Luego de que se ha descargado el producto sobre una estantería (en el proceso de moldeo), se traslada hasta el secadero tipo túnel de cámaras (figura 7), el cual funciona con calor residual de la etapa de cocción (este proceso es conocido como cogeneración). En este punto lo que se hace es retirar el agua agregada en el proceso anterior (moldeo) por medio de ventilación forzada al interior de los túneles de secado y variando la temperatura a lo largo de este. Este secadero es operado de forma automática por medio de controladores lógicos programables o similares, que a su vez controlan compuertas con mecanismos automáticos para regulación de temperaturas y caudales requeridos según la curva de Bigot que se tenga estandarizada. También contienen variadores de velocidad para regular la velocidad de ventilación y regímenes de vientos dentro del secadero.

En la etapa de cogeneración se reutiliza cerca del 90% del calor residual de la etapa de cocción, lo que implica un uso menos intensivo del combustible en esta etapa, que para nuestro caso es el carbón, lo que conlleva a menos emisiones de gases a la atmósfera, haciendo el proceso amigable con el medio ambiente.

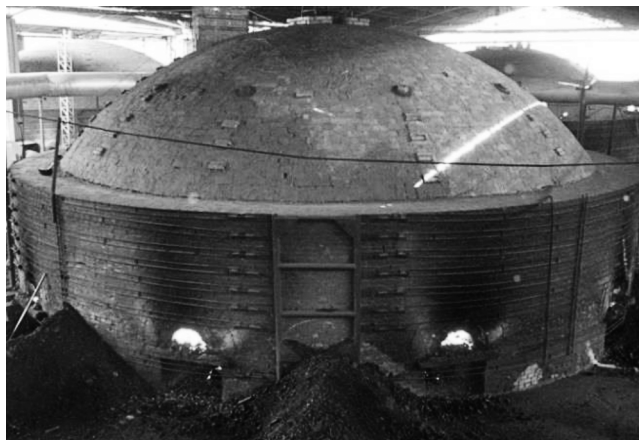
**Figura 7. Secado (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)**



- **Cocción:** Es la última etapa, que consiste en aumentar la temperatura del producto, el cual está seco, para darle propiedades mecánicas aptas para su uso como la resistencia a la rotura, resistencia a la abrasión, entre otras. El material que viene del secadero se dispone dentro del horno colmena o de llama invertida (figura 8), utilizados para la quema de productos especiales. En este punto se puede vitrificar, es decir, darle a la arcilla una especie de vidriado superficial utilizando NaCl. Sin embargo, el Na reacciona con la arcilla, dejando el Cl libre para que, con la humedad del ambiente, forme HCl, lo que convierte

este tipo de hornos en uno de los más contaminantes en su tipo. Aun así, su uso es muy extendido en Norte de Santander y en general en la zona de la cordillera Oriental (en el país existen más de 625 hornos de llama invertida), y se observa que cumplir con las normas ambientales en estos casos resulta muy costoso debido a los procesos y equipos adicionales que hay que utilizar para controlar el proceso de combustión de forma adecuada.

**Figura 8. Cocción en el horno colmena**



- **Embalaje y empaque:** Luego de que el producto sale de la etapa de cocción y tiene todas las propiedades requeridas para su uso, se procede a empacarlo para su despacho. El material proveniente del horno se descarga de las vagonetas y se organiza de tal manera que sea fácilmente transportable por medio de bandas transportadoras, en las cuales están dispuestas personas para hacer el control de calidad final al producto y luego apilarlo en unidades de metros cuadrados para su posterior empaque, el cual se realiza mediante el recubrimiento de plástico del producto por metro cuadrado. Finalmente, el producto es almacenado en las bodegas según tamaño, forma, color y texturas, y queda listo para ser despachado.

## **4. Nutrientes tecnológicos producidos en la región**

### **4.1 Residuos orgánicos**

- **Cascarilla de arroz:** En el departamento se siembra arroz en nueve de los cuarenta municipios que lo componen: Cúcuta, El Zulia, Tibú, San Cayetano, La Esperanza, Puerto Santander, Villa del Rosario, Los Patios y Santiago, agrupando un área de producción de 14.200 hectáreas cultivadas por el sistema de riego (DANE, 2016). En la tabla 1 se muestran las empresas productoras de arroz de la ciudad de Cúcuta.



**Tabla 1. Empresas productoras de arroz de Cúcuta**

Nombre	Ubicación
Arrocera Agua Clara S.A.S.	Calle 7 N.º 5A-66 Zona Industrial
Arrocera San Valentín	Calle 6N 4-102 Zona Industrial
Arrocera La Palestina S.A.	Avenida 4 7N-185 Zona Industrial
Arroz Gelvez S.A.S.	Autopista Aeropuerto Av 7ª N.º 18N-87
Arrocera Agua Blanca S.A.	Avenida 4 7N-185 Zona Industrial
Arroz Zulía	Avenida 6 N.º 13-06 El Salado
Federación Colombiana de Arroceros	Avenida 5 1ª-53 Cúcuta
Molinos Roa S.A.	Avenida 10 26 B-68 Cúcuta

La cascarilla de arroz tiene forma de canoa y superficie rugosa, y presenta un color amarillento. Su longitud depende de la variedad, y está entre 8 a 10 mm de largo por 1 a 2 mm de ancho, que corresponde del 30 al 40 % de su longitud. De acuerdo con su tamaño, una cascarilla pesa entre 2,5 y 4,8 mg (Quiceno, 2010).

La cascarilla y la cutícula o polvillo de arroz son dos desechos agroindustriales subproductos del procesamiento de arroz, de los cuales la primera representa aproximadamente el 20% (Ahumada & Rodríguez-Páez, 2006). La cascarilla de arroz tiene diversos usos a nivel industrial, tales como: producción de ácido acético y acetona por destilación, producción de butanol, acetona y etanol por hidrólisis, combustible alternativo, adición en mezclas para materiales de construcción, ladrillos refractarios, abono, plásticos linóleos, producción de materiales abrasivos y silicatos alcalinos.

Chur (2012) resalta entre los porcentajes más significativos de la cáscara de arroz la cantidad de cenizas y su elevado contenido de materia volátil, comparándolo con los carbones (tabla 2).

**Tabla 2. Parámetros de los diferentes tipos de arroz**

Parámetros (%)	Tipos de arroz			
	Canadá	California, USA	China	Colombia
Material volátil	66,4	63,5	52,0	65,6
Carbono fijo	13,2	16,2	25,1	17,9
Ceniza	20,0	20,3	16,9	16,7

Fuente: Chur (2012, p. 10).

Es importante recordar que el porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible del material (Echeverría & López, 2010). Las tablas 3 y 4 resumen las caracterizaciones física y química de la cascarilla de arroz.

**Tabla 3. Caracterización física de la cascarilla de arroz**

<b>Propiedades y características físicas</b>	
Estado físico	Sólido granulado
Color	Beige
Olor	Olor característico
Longitud (mm)	4-14
Ancho (mm)	2-4
Espesor promedio ( $\mu\text{m}$ )	50
Peso específico (mg)	2.944-3.564
Solubilidad en el agua	Insoluble
Granulometría sobre malla #4 (%)	0
Granulometría sobre malla #8 (%)	4
Granulometría sobre malla #10 (%)	18,6
Granulometría sobre malla #20 (%)	74,6
Densidad verdadera ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,42
Densidad aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0,65
Densidad a granel ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0,10
Porosidad del combustible (%)	54
Fracción de espacios libres (%)	85
Fase gaseosa teórica (%)	93

Fuente: Echeverría y López (2010, p. 73).

**Tabla 4. Caracterización química de la cascarilla de arroz**

<b>Propiedades y características químicas</b>	
Humedad (%)	7,41
Cenizas (%)	19,39
Materia volátil (%)	57,09
Carbono fijo (%)	16,11



Propiedades y características químicas	
pH a 25 °C	7,1
Fibra: celulosa (%)	45,38
Proteínas (%)	3,59
Extracto con éter: grasa (%)	0,4
Carbohidratos totales (%)	69,23

Fuente: Echeverría y López (2010, p. 73)

• **Cisco de café:** La Federación Nacional de Cafeteros del departamento de Norte de Santander (2014) expone que el departamento está conformado por 36 municipios cafeteros que tienen sembradas 37.996 hectáreas de café, con una producción anual estimada de 15 millones de café pergamino seco. El 87% de esta área presenta cultivos tecnificados, y el 13% cuenta con cultivos tradicionales. La población cafetera está conformada por pequeños productores cuyas fincas tiene un área promedio en café de 0,5 a 3,0 hectáreas. La caficultura de la región está ubicada en la zona óptima para café entre los 1.200 m.s.n.m. y los 1.800 m.s.n.m.

Vásquez (2015) expone que la cascarilla de café (también conocida como cisco o pergamino de café), proveniente del grano de café, se obtiene del proceso de trillado (descascarado) y constituye alrededor del 12% del peso del grano en base seca. Palacios y Betancurt (2005) exponen que es una envoltura cartilaginosa de color blanco amarillento de aproximadamente 100 micrómetros de espesor y que corresponde al endocarpio (pergamino) del fruto, cuya semilla se encuentra en una forma suelta dentro de esta.

El endocarpio del fruto, constituido por la cascarilla (cisco) y la película plateada, es un subproducto con excelentes propiedades combustibles. El cisco representa en peso el 4,2% del fruto seco (Montilla *et al.*, 2008).

Vásquez (2015) expone que en promedio la humedad de la cascarilla de café corresponde al 13,56% del peso, en base seca. Este resultado fue comparado con el de varios autores que mencionan un nivel mínimo de humedad del 10% hasta un máximo de 12,5%, variación que se debe principalmente a la variedad de café de donde proviene el residuo.

La cascarilla de café tiene la siguiente composición química: contenido de humedad de un 5 a 8%, materia seca (92,8%), extracto etéreo (0,6%), nitrógeno (0,39%), cenizas (0,5 a 0,6%), densidad aparente promedio de 0,33 g/cm<sup>3</sup>, y contenido de celulosa del 57% de cada 50 g obtenidos por kilogramo de café cereza (Montilla *et al.*, 2008).

De acuerdo a estudios realizados por Palacios y Betancurt (2005), el cisco o cascarilla de café presenta las siguientes propiedades:

- » Poder calorífico de aproximadamente 4.245,8 kcal/kg.
- » Porcentaje de cenizas de aproximadamente 0,6%.
- » Humedad promedio de 5,4%.
- » Material volátil de 87,7%.
- » Densidad aparente promedio de 0,33 g/cm<sup>3</sup>.
- » Tamaño de las partículas que oscila entre 0,425 y 2,36 mm de diámetro.

En la tabla 5 se observan los residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización de 1.000 g de café cereza según Valencia (2010).

**Tabla 5. Residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización del café**

Proceso	Residuo obtenido	Pérdida (en gramos)
Despulpado	Pulpa fresca	436
Desmucilaginado	Mucilago	149
Secado	Agua	171
Trilla	Cisco y película plateada	42
Torrefacción	Volátiles	22
Preparación bebida	Borra	22
Pérdida acumulada		924

Tomando una producción promedio nacional de siete millones de sacos de café pergamino de trilla, equivalentes a 420.000 toneladas, 25.000 toneladas corresponderían a cisco de café. En Colombia no se le ha dado a la cascarilla o cisco de café un uso diferente al de combustible para alimentar hornos. Sin embargo, se han realizado investigaciones en donde se encontró que de este material se pueden obtener plásticos, cartones, baldosines, rayón y viscosa; además, si se combina con la pulpa, se podría obtener acetona, alcohol metílico, amoniaco, carbón, alquitrán, abonos y ácido acético. En la tabla 6 se muestra la composición química del cisco de café (Valencia, 2010).

**Tabla 6. Composición química del cisco de café**

%	Café Arábica (%)	Café Robusta (%)
Extracto etéreo	0,40	-
Proteínas totales	1,50	2,20

%	Café Arábica (%)	Café Robusta (%)
Celulosa bruta	50,20	60,20
Hemicelulosa	11,60	7,60
Azúcares	21,30	-
Pentosa	26,00	-
Cenizas	1,00	3,30
Silicio	15,70	-
Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,40	-
Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	13,60	-
Calcio	19,60	-
Magnesio	12,20	-
Sodio	3,40	-
Potasio	18,00	-
Grasas	0,60	-

## 4.2 Residuos inorgánicos

• **Cenizas volantes:** La Asociación Mundial del Carbón reportó en 2015 que el carbón se ha usado como combustible en la generación de más del 41,1% de la electricidad del mundo y en más del 70% de acero a nivel mundial, alcanzando un uso de 8.022,5 toneladas métricas (Mt) en 2014. En este panorama, Colombia se encuentra en el top diez de los productores de carbón de vapor con 83,5 Mt (World Coal Association, 2016), de las cuales se exportan más del 90%. El Ministerio de Minas y Energía y la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia) (2012) han reportado por su parte que las reservas de carbón en Colombia en 2012 eran de 16.436 millones de toneladas, lo que representa 92,44 años más de explotación. El 95% de dichas reservas se ubica en los departamentos de La Guajira, Cesar, Córdoba, Norte de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle del Cauca y Cauca.

La combustión de este mineral genera diferentes subproductos o desechos, como cenizas de fondo, escoria, cenizas volantes, entre otros. En particular, las cenizas volantes corresponden a la parte inorgánica del carbón, son ricas en SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y se obtienen entre los 1.200 y 1.700 °C (Mejía, Rodríguez & Mejía, 2014) durante la precipitación electrostática o mecánica del polvo suspendido en los gases de la combustión (Caballero & Medico, 2013). En el caso de las termoeléctricas, este residuo se genera por la combustión de carbón en la producción de energía (Peña & Ortega, 2014; Rajamannan *et al.*, 2013). Por otro lado, Ruiz *et al.* (2000) exponen que en la industria cerámica se

han usado cenizas volantes clase F, para elaborar ladrillos refractarios y pisos, cementos geopoliméricos de alta temperatura y en la producción de zeolitas por procesos hidrotermales”.

Ruiz *et al.* (2000) anotan que, en las centrales térmicas, “un mínimo del 70%-75% de la ceniza presente en el carbón se recoge en forma de cenizas volantes, y por término medio se producen alrededor de 700 toneladas anuales de cenizas volantes por MW de potencia instalada”. Esto se anuda con los resultados del informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano de diciembre de 2015 (Sistema de Información Eléctrico Colombiano, 2015), que indica que en Colombia anualmente se producen 946.400 toneladas de cenizas volantes, y 229.600 toneladas en Norte de Santander. Caballero y Médico (2013), por su parte, señalan que la producción de cenizas volantes representa hasta un 80% del total de cenizas generadas y, en esa misma línea, Yu *et al.* (2012) afirman que cerca del 80% de los minerales del carbón se convierten en cenizas volantes durante el proceso de combustión.

Por su parte, la escoria o cenizas de hogar son aquellas que, por gravedad, caen al fondo durante la combustión y se diferencian de las volantes principalmente por el tamaño de partícula.

Varios estudios reportan el desarrollo de nuevos materiales de construcción a partir de residuos, entre ellos las cenizas volantes, para la mejora de propiedades de los materiales de construcción; sin embargo, muy pocos se enfocan en las baldosas cerámicas (Kockal, 2012). Es importante resaltar que, tal como lo afirma Ahmaruzzaman (2010), las características químicas de las cenizas volantes varían dependiendo del tipo y composición mineralógica del carbón (antracita, bituminoso, subbituminoso, lignito) y de las variables del proceso de combustión donde son generadas, tales como temperatura, tiempo de residencia del carbón, entre otras, y su color varía de gris a negro dependiendo de su contenido de inquemados de carbón.

Según la ASTM C618 (American Society for Testings and Materials, 2012), otras de las variables que inciden sobre las características físico-químicas de este residuo son el grado de pulverización del carbón, los aditivos utilizados para ayudar a los procesos de combustión o poscombustión y los métodos de recolección, almacenamiento y transporte. En la tabla 7 se expone la composición química de varias cenizas volantes analizadas por diversos autores.

Tabla 7. Composición química de diferentes cenizas volantes

Óxido	(%)peso)											
	Eraring Power (Australia) (Yu et al., 2012)	Angang No 2 (China) (Yu et al., 2012)	Collie (Australia) (Temujon, Rickard & Riessen, 2013)	Eraring (Australia) (Temujon et al., 2013)	Tarong (Australia) (Temujon et al., 2013)	Bagannur (Mon-golia) (Temujon, Rickard & Riessen, 2013)	Shivee ovo (Mon-golia) (Temujon, Rickard & Riessen, 2013)	Termoelectrica (Colombia) (González et al., 2014)	Tunchilek (Turquia) (Kockal, 2012)	Seytomer (Turquia) (Kockal, 2012)	Perak (Malasia) (Fauzi et al., 2016)	Terengganu (Malasia) (Fauzi et al., 2016)
SiO <sub>2</sub>	60,0	61,6	51,38	65,47	73,68	55,2	33,85	51,49	60,19	52,12	20,7	55,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,0	24,5	26,9	23,0	22,4	14,15	12,15	26,37	18,11	14,06	9,01	25,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,3	5,4	13,2	4,03	0,64	10,55	9,89	9,37	10,28	12,64	32,0	10,17
CaO	1,4	3,5	1,74	1,59	0,08	15,0	30,8	0,63	2,63	6,41	27,1	1,32
K <sub>2</sub> O	0,93	1,2	0,9	1,68	0,53	1,31	0,73	1,05	1,61	2,03	2,51	1,59
TiO <sub>2</sub>	1,1	1,0	1,47	0,84	1,28	0,25	0,35	1,08	0,91	0,75		
MgO	1,4	0,7	1,41	0,51	0,17	1,56	6,41	0,32	3,57	4,76	2,05	0,31
Na <sub>2</sub> O	0,4	0,4	0,41	0,56	0,09	-	-		0,10	0,66	1,00	1,59
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,03	1,09	0,27	0,08	-	-	0,13	0,26	0,14		
SiO			0,23	0,05	0,001	0,25	0,44					
MnO						0,34	1,185		0,14	0,11		
SO <sub>3</sub>	1,0	0,1				1,23	3,65		1,41	3,02	1,61	0,18
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04	0,04						0,13				
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>								0,03	0,11	0,09		
*PF			0,44	1,37	0,79	1,05	0,30	9,23	0,77	3,00	2,97	5,25
ASTM C618-12			F	F	F	C	C	F	F	F	C	F
Tipo de carbón	B	L				L	L					

Como se puede observar, las cenizas volantes están compuestas en su mayoría por compuestos de sílice, alúmina, hierro y calcio, tal como lo expone la American Coal Ash Association Educational Foundation (s.f.). El contenido de estos compuestos está influenciado por el tipo de carbón de origen, y se puede determinar tal como lo expone Ahmaruzzaman (2010) (tabla 8).

Las cenizas provenientes de carbón bituminoso tienen como componentes principales sílice, alúmina, óxido de hierro, y calcio, con cantidades variables de carbono, que se mide por las pérdidas por fuego, mientras que las cenizas de carbones lignitos y subbituminosos se caracterizan por concentraciones más altas de calcio y óxido de magnesio, y menor contenido de sílice, óxido de hierro y carbono. Las cenizas de carbón antracita son muy poco comunes, ya que este tipo de carbón no suele usarse en calderas.

**Tabla 8. Rangos normales de la composición química de las cenizas volantes producidas por diferentes tipos de carbón**

Componente (% peso)	Bituminoso	Subbituminoso	Lignito
SiO <sub>2</sub>	20-60	40-60	15-45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-35	20-30	10-25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO <sub>3</sub>	0-4	0-2	0-10
Na <sub>2</sub> O	0-4	0-2	0-6
K <sub>2</sub> O	0-3	0-4	0-4
PF	0-15	0-3	0-5

Fuente: Ahmaruzzaman (2010, p. 330).

La composición química de este residuo no solo permite identificar el tipo de carbón del cual se originó, sino que permite clasificarlo bajo la norma ASTM C618 como cenizas clase C o clase F (ver tabla 9), lo cual determina su aptitud como material puzolánico. Las cenizas clase F, generalmente originadas por carbones bituminosos o antracitas, contienen más de 70% en peso de SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y tienen bajo contenido en cal, además de caracterizarse por tener alta actividad puzolánica (endurecimiento cuando se hace reaccionar con Ca(OH)<sub>2</sub> y agua), mientras que las cenizas clase C, caracterizadas por poseer propiedades cementantes (autoendurecimiento cuando se hace reaccionar con agua) e hidráulicas, tienen una relación SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre el 50 y el 70% en peso y alto contenido de cal, que se produce normalmente a partir

de la combustión de carbones lignitos o subbituminosos (Kockal, 2012; Ahmaruzzaman, 2010; American Society for Testing and Materials, 2012; Temuujin *et al.*, 2013; González *et al.*, 2014; Fauzi *et al.*, 2016; Arguiz, 2014). En cuanto a su composición mineralógica, las cenizas bajas en Calcio están compuestas principalmente de cuarzo, mulita y magnetita (Ha *et al.*, 2016; Gómez, 2011), y las cenizas con alto contenido de Ca están compuestas de cuarzo, C<sub>3</sub>A, CS y C<sub>4</sub>AS (Ahmaruzzaman, 2010).

**Tabla 9. Especificaciones para las cenizas según norma ASTM C618**

	<b>Clase C (%)</b>	<b>Clase F (%)</b>
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	>50	>70
CaO	>10	<10
SO <sub>3</sub>	<5	<5
Álcalis disponibles como NaO <sub>2</sub>	<1,5	<1,5
Pérdidas por fuego	<6	<6
Humedad	<3	<3

Fuente: ASTM C618 (American Society for Testing and Materials, 2012).

• **Inquemados de carbón:** La combustión del carbón en los hornos colmena genera grandes cantidades de ceniza como residuo, las cuales contienen carbón sin quemar que comúnmente se denomina *inquemado*. Este tiene un tamaño de partícula mayor que el material mineral y, por lo tanto, se puede separar en un porcentaje considerable para su uso como combustible o como precursor para la producción de carbón activado, y para la utilización del material mineral en la industria de la construcción ya que se le ha retirado la materia orgánica que imposibilita su uso (Velásquez *et al.*, 2007). La disposición final de estos desechos resulta siendo un grave problema medioambiental para la industria cerámica de la región.

Bartoňová (2015) expone que, si bien los niveles de inquemados de carbón en las cenizas es muy variado, se puede establecer que será por lo menos del 1%. Otros autores exponen contenidos entre 1-12% (Mehment & Kizgut, 2016), el 23% (Senneca, 2008) e incluso hasta el 50% (Velásquez *et al.*, 2007). En cualquier caso, se ha establecido que el contenido de inquemados en las cenizas está determinado por diversos factores que pueden clasificarse dentro de dos grupos:

- » Características del carbón: tipo de carbón, granulometría del carbón, contenido de materia volátil, humedad, porosidad, fragmentación, superficie específica, cocombustión de carbón (mezcla con combustibles alternativos) (Velásquez *et al.*, 2007; Bartoňová, 2015).

» Diseño del sistema de combustión y las condiciones de funcionamiento: tipo de unidad de combustión, tipo y número de quemadores, tecnología de la combustión, temperatura de combustión y presión, tiempo de residencia, disponibilidad de oxígeno, velocidades de flujo de calor, patrones irregulares de llama (Bartoňová, 2015; Mehment & Kizgut, 2016).

La separación de los inquemados del carbón de las cenizas volantes se puede realizar por procedimientos en húmedo (como separación por densidad, flotación de la espuma y de aglomeración de aceite) o en seco (como tamizado, fluidización incipiente y separaciones triboelectrostáticas). Estos últimos no representan ningún riesgo en cuanto se trata de contaminación de la muestra, contrario a las técnicas en húmedo (Bartoňová, 2015).

En la literatura se evidencia que uno de los métodos utilizados para trabajar con inquemados supone la separación de estos por tamizado de las cenizas en diversas mallas. A cada retenido se le realiza un análisis próximo para determinar la cantidad de inquemados en cada uno, y con ello se identifica la malla que retiene la mayor cantidad de partículas inquemadas, la cual es usada para separar la muestra total. De este modo se obtienen buenos porcentajes de recuperación (Velásquez *et al.*, 2007).

Las partículas de inquemados están compuestas por porciones variables de materiales inorgánicos (principalmente minerales de cuarzo, anhidrita, caolinita, mica, calcita, óxido de calcio, magnetita, hematita y anatasa) y componentes orgánicos (Kisella *et al.*, 2016). En la tabla 10 se presentan diversas caracterizaciones de inquemados en cenizas de carbón de diversas fuentes.

**Tabla 10. Características de los inquemados**

	<b>Planta de energía (Polonia) (Castells &amp; Cadavid, 2011)</b>			<b>Ladrillera (Colombia) (Panwar <i>et al.</i>, 2011)</b>	<b>Cervecería (Colombia) (Panwar <i>et al.</i>, 2011)</b>
<b>Diámetro (mm)</b>	<b>&lt;1</b>	<b>1-1,5</b>	<b>&gt;1,5</b>	<b>0,212-0,417</b>	<b>0,295-0,417</b>
<b>% Humedad</b>	4,1	6,0	7,9	7,2	8,4
<b>% Cenizas</b>	57,3	44,6	12,8	32,2	20,8
<b>% Volátiles</b>	6,0	5,5	8,3	15,0	6,4
<b>% Carbono fijo</b>	32,6	43,9	71,0	45,6	64,5
<b>C</b>	34,2	43,8	69,1	-	-
<b>H</b>	0,5	0,7	1,3	-	-



	Planta de energía (Polonia) (Castells & Cadavid, 2011)			Ladrillera (Colombia) (Panwar <i>et al.</i> , 2011)	Cervecería (Colombia) (Panwar <i>et al.</i> , 2011)
N	0,3	0,3	0,4	-	-
S	1,2	1,1	1,6	-	-
O	2,4	3,5	6,9	-	-

## 4.3 Importancia del uso de residuos como nutrientes tecnológicos en la industria cerámica

### 4.3.1 Residuos orgánicos

- **Cascarilla de arroz:** Eliche *et al.* (2011) diseñaron mezclas de arcilla con adiciones de varios residuos industriales, entre ellos el cisco de café (3% en peso), seco y molido con tamaño de partícula 150  $\mu\text{m}$ , para evaluar su influencia sobre la contracción lineal, la densidad aparente, la absorción de agua y las propiedades mecánicas y térmicas en ladrillos. Entre los residuos estudiados, la incorporación de café molido fue una de las más beneficiosas, con valores de resistencia a la compresión y absorción de agua similares a los ladrillos sin residuos y 19% de mejora en la conductividad térmica. La absorción de agua y las micrografías SEM indicaron que los cambios en los resultados se debían al tipo de porosidad que forman la cantidad y el tipo de residuo. Esta investigación contribuirá al análisis y comparación de los resultados obtenidos en la investigación propuesta, en relación con uno de los materiales seleccionados para el diseño de las mezclas cerámicas.

### 4.3.2 Residuos inorgánicos

- **Cenizas volantes:** Es posible inferir que el uso final de las cenizas volantes difiere según las propiedades requeridas de estas y del producto final. Aunque son numerosos los estudios realizados para la utilización de cenizas clase F y clase C en productos de concreto, en esta sección se referenciarán solo los enfocados en la utilización de cenizas volantes para la fabricación de materiales cerámicos.

Ahmaruzzaman (2010) ha recopilado numerosos estudios sobre la utilización de cenizas volantes en diferentes industrias. En particular, en cuanto a su uso con materiales cerámicos, ha revelado que se puede llegar a fabricar ladrillos livianos, lo que representa un ahorro económico para el fabricante, asociado a los costes de transporte de envío del producto acabado, cuando el peso es un factor relevante. Dependiendo del tipo de arcilla, la ceniza volante puede

ser utilizada en proporciones de 20-50% para producir ladrillos 40-50% más porosos. Este autor también afirma que recientemente se ha demostrado que las cenizas volantes podrían mejorar la resistencia a la compresión de los ladrillos y hacerlos más resistentes a las heladas; incluso pueden llegar a mejorar el índice de plasticidad de la mezcla para facilitar el proceso de extrusión de ladrillos.

Peña y Ortega (2014) citan a Rajamannan *et al.* (2013) y a škvára, Jílek y Kopecký (2005) para exponer que las cenizas volantes clase F se han utilizado en la industria cerámica para elaborar ladrillos refractarios y pisos, así como cementos geopoliméricos de alta temperatura, y en la producción de zeolitas por procesos hidrotermales.

Rajamannan *et al.* (2013) han expuesto algunos efectos del uso de cenizas volantes en las propiedades de los productos cerámicos con mezclas de dos tipos de cenizas en proporciones de 0-30% en peso a la pasta de una baldosa, molida en húmedo, secada por pulverización, y moldeada y cocida a 900, 1.000, 1.050 y 1.100 °C. Así se encontraron dos combinaciones óptimas para la máxima resistencia a la flexión y compresión y porosidades más bajas: 30% de ceniza clase A, y 20% de ceniza clase B, cocidas a 1.050 °C; la diferencia entre ambas cenizas radica en el alto contenido de CaO y SO<sub>3</sub> de la ceniza B. Los autores describen una correlación lineal entre el desarrollo de la resistencia y la formación de mullita, favorecida por la presencia de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> en las cenizas.

Iglesias, Acosta y García (2013) estudiaron la adición de cenizas volantes como residuos de una central térmica GICC (gasificación integrada en ciclo combinado) en materiales cerámicos prensados, con lo que revelaron que, debido a sus propiedades térmicas y físico-químicas, los granos de escoria se adhieren a la matriz cerámica, aumentando la cohesión y disminuyendo la porosidad del material; por lo tanto, la adición de cenizas volantes de GICC no aumenta la absorción de agua, ni disminuye la resistencia mecánica, como ocurre con la adición de otros materiales de desengrase tales como el cuarzo o las arenas de carbonatos. Igualmente, Iglesias *et al.* (2015) realizaron este mismo estudio para materiales cerámicos extruidos, y concluyeron que la adición de un 10 % de cenizas volantes GICC permite aumentar la resistencia mecánica, en verde y en cocido, al tiempo que reduce la absorción de agua y el coeficiente de saturación en el producto final, sin deformación de las piezas ni variación significativa del color, y disminuye la temperatura de sinterización, lo que repercute en un ahorro energético y económico.

Mann *et al.* (2016) analizaron el efecto de las cenizas volantes en ladrillos con una alta relación de sustitución de arcilla en la protección contra la radiación, y revelaron que ladrillos con un contenido de cenizas volantes de 50% son capaces de detener los rayos gamma en el intervalo de 93,1%, 86,2% y 84,1%

de las radiaciones gamma incidentes de energías de 661,6 keV, 1.173,2 keV, y 1.332,5 keV, respectivamente.

- **Inquemados de carbón:** Sánchez, J y Rozo, S (2013) reportaron que los quemados de carbón durante el proceso de amasado de bloques presentan un comportamiento similar al de la arcilla, por lo que no necesitan adicionar mayor contenido de agua (ver tabla 11). Sin embargo, su comportamiento en secado muestra una alta contracción, lo que puede dar lugar a roturas de las piezas en este proceso. Las pérdidas por calcinación indican que con la adición de este material se incrementa el poder aligerante de los prototipos, lo que se evidencia en la disminución de la densidad aparente y el aumento de la absorción de agua en comparación a la muestra patrón. Además, la resistencia a la compresión se ve bastante afectada, al mostrar una disminución del 28,28% y 30,74% para adiciones de 10% y 15% de quemados, respectivamente.

**Tabla 11. Comportamiento físico mecánico de bloques de arcilla con adición de quemados**

Adición	%Humedad en crudo	%Contracción en secado	%Pérdidas por fuego	%Contracción en cocido	Densidad aparente g/cm <sup>3</sup>	%Absorción de agua	Conductividad térmica K/m*K	Resistencia a la compresión Kgf/cm <sup>2</sup>
<b>0%</b>	18,3	4,1	6,3	2,9	2,0	8,3	0,072	203,9
<b>10%</b>	19,8	6,2	11,8	2,5	1,9	9,7	0,067	149,5
<b>15%</b>	19,6	6,5	9,4	3,3	2,8	9,8	0,067	148,2

La revisión bibliográfica realizada en las bases de datos de ScienceDirect, Proquest, Scielo, Elsevier y Scopus con palabras claves como “unburned carbon”, “unburned in fly ash”, “unburned residues in fly ash”, “ceramic tiles”, “bricks” y “masonry”, con el fin de indagar acerca del comportamiento de las propiedades, físicas, mecánicas y/o térmicas de productos cerámicos con la adición de quemados de carbón, no arrojó ninguna coincidencia. Sin embargo, se encontraron varios estudios que relacionan el comportamiento de estas propiedades en materiales puzolánicos.

## 5. Investigaciones realizadas en el entorno internacional y nacional

La producción de materiales cerámicos de construcción se ha realizado desde tiempos muy antiguos. En la actualidad siguen siendo uno de los materiales más

empleados dentro del sector de la construcción alrededor del mundo (Sánchez, 2014; Pedroza, 1996).

El aumento de la actividad antropogénica ha causado impactos significativos sobre la biosfera. El cambio climático y la contaminación de las fuentes hídricas son dos de los aspectos más relevantes que se evidencian en la actualidad (O'Neill & Oppenheimer, 2002). Esta problemática ha conllevado a que desde los Gobiernos de los diferentes territorios se generen medidas cada día más estrictas que permitan reducir los impactos negativos de la actividad humana. Legislación menos permisiva, así como campañas de concientización, se ven a diario en los informes de los diferentes medios de comunicación (Sánchez & Ramírez, 2013). Temas como producción limpia, desarrollo sostenible y economía circular han surgido a partir de las tendencias en pro de la protección de la biosfera. En el caso particular de la industria cerámica, estos temas anteriormente mencionados han ganado interés por los empresarios del sector, a fin de reducir costos, generar nuevos materiales o tener una mejor imagen en el mercado (Sánchez & Ramírez, 2013).

La utilización de residuos de diferentes industrias como material sustituto del mineral arcilloso en la pasta cerámica es una de las áreas de trabajo donde se ha venido realizando investigación. Como este tema es el centro de interés de este trabajo, se presentan a continuación los aspectos más relevantes que permiten conocer cuál es el estado de la investigación en el entorno internacional, nacional y regional.

Dentro de las principales instituciones, destaca el liderazgo de la Universidad de Jaén (España) en este campo de investigación. Asimismo, es importante resaltar la gran cantidad de instituciones brasileñas dedicadas hacer investigación en este campo. La revisión de la literatura permite observar la existencia de trabajos que incluyen la utilización de residuos orgánicos e inorgánicos, conformados tanto por extrusión como por prensado. También se observan variaciones en las temperaturas de cocción, aunque resaltan los valores cercanos a los 1.000 °C ya que en la gran mayoría de los casos se pretende su aplicación como ladrillo de construcción. La tabla 12 presenta los principales trabajos encontrados.

Tabla 12. Principales investigaciones evidenciadas en el entorno internacional

Ref.	Residuos empleados	Condiciones de elaboración	Propiedades tecnológicas evaluadas	Otros análisis realizados	Observaciones
Souza <i>et al.</i> (2011)	Ceniza de bagazo de caña	Sustituciones de 0%, 20%, 40% y 60 %. Conformado por prensado, con temperaturas de cocción de 500, 800, 900, 1000, 1100 y 1200 °C	Absorción de agua, resistencia a la flexión, contracción de cocción	DRX, FRX, TG/DSC	Hasta 20 % de cenizas y en temperaturas arriba de 1.100 °C se logra obtener una absorción de agua por debajo del 12%. En 1.200 °C se alcanza un porcentaje de absorción de agua del 6%, con una resistencia a la flexión de 30 MPa. El trabajo hace seguimiento de la microestructura (DRX) a medida que se incrementa la temperatura
García y Mendiola (2016)	Cascarilla de café, cáscara de coco y desecho de la mazorca del maíz	0%, 4%, 8% y 12% en peso, a temperaturas de cocción de 800, 900 y 1.000 °C. Moldeo manual	Resistencia a la compresión y absorción	No disponibles	Hasta un 4% de adición de residuo de café y maíz permite obtener materiales cerámicos con propiedades tecnológicas aceptables en la industria de la construcción. La cáscara de coco no permitió obtener resultados satisfactorios. No se hace caracterización estructural del material cocido
Menezes <i>et al.</i> (2005)	Desechos de aserrado de granito	Sustitución entre el 15 y 40%. Conformado por extrusión y temperaturas de cocción de 800, 900 y 1.000 °C	Absorción de agua y resistencia mecánica a la flexión	FRX, TG, MEB, DRX	Hasta un 20 % de residuo permite obtener una absorción de agua similar al material de referencia. Sin embargo, la resistencia mecánica se vio mejorada por la presencia de residuo
Sutcu y Akkurt (2009)	Residuos de producción de papel	Hasta un 30 % de residuo de papel fue utilizado. Conformado por prensa y cocción a 1.100 °C	Absorción de agua, contracciones, resistencia a la compresión	MEB,FRX,-DRX, TG/DSC	La presencia de este residuo contribuye a disminuir las contracciones de cocción. La resistencia a la compresión se reduce con la adición del residuo (m10%), el valor obtenido para esta variable se redujo en 60% respecto a la muestra patrón. Un caso similar se da para la absorción de agua. La conductividad térmica se redujo hasta en un 50%

Ref.	Residuos empleados	Condiciones de elaboración	Propiedades tecnológicas evaluadas	Otros análisis realizados	Observaciones
Demir (2006)	Residuos de té	0%, 2,5% y 5% de sustitución. Cocción hasta 900 °C. Conformado por extrusión	Absorción de agua, resistencia a la compresión	MEB, FRX	La adición del residuo conlleva una mayor cantidad de agua para el moldeo, así como un incremento en las contracciones de secado y cocción. No se observó corazon negro. La adición del residuo aumentó la resistencia mecánica a la compresión
Dondi <i>et al.</i> (2009)	Vidrio de Tv/PC	Cocción entre 900, 950 y 1.000 °C. Conformado por extrusión. Reemplazos hasta del 5%	Absorción de agua, resistencia a la flexión	FRX, DRX	La granulometría del residuo afecta significativamente en las propiedades obtenidas, y granulometría muy fina favorece el proceso. Sustituciones inferiores al 3% presentan resultados similares a la muestra patrón
Alonso-Santurde <i>et al.</i> (2012)	Arenas de fundición	850, 950 y 1.050 °C. Conformado por extrusión. Sustitución hasta del 50%.	Resistencia a la flexión, absorción de agua	FRX, TG/DSC, DRX	Hasta 30% de residuo puede ser usado para obtener materiales con aplicación en la industria de la construcción. Se disminuye la contracción de cocción, pero se ven afectadas la absorción de agua y la resistencia mecánica
Iglesias <i>et al.</i> (2013)	Cenizas volantes	Conformado por extrusión. Sustitución del 10%	Resistencia mecánica, absorción de agua	No disponibles	Las volantes provienen de una central térmica GICC, en materiales cerámicos prensados. Los granos de escoria se sueldan a la matriz cerámica, aumentando la cohesión y disminuyendo la porosidad del material
Boltakov <i>et al.</i> (2016), Zhang (2013)	Residuos industriales inorgánicos		Resistencia final, la absorción de agua		Se evaluaron tamaños de partículas, residuo adicionado, porcentajes de adición, tipo de moldeo y temperaturas de cocción

En relación con el entorno nacional, se evidenciaron pocos trabajos en la literatura. Se destacan investigadores de la Universidad del Valle, la Universidad de Los Andes, la Universidad Tecnológica de Pereira y la Universidad Nacional de Colombia. Las principales características de los trabajos realizados se presentan en la tabla 13.

**Tabla 13. Principales investigaciones evidenciadas en el entorno nacional**

Ref.	Residuos empleados	Condiciones de operación	Propiedades tecnológicas evaluadas	Otros análisis realizados	Observaciones
García-Ubaque, González-Hässig y Vaca-Bohórquez (2013), García-Ubaque et al. (2007), García Ubaque, Giraldo y Moreno-Piraján (2013)	Cenizas de incineración de residuos municipales	1%, 5%, 10%, 20%, 40% de sustitución. El material usado fue pasante malla 200 Tyler. Moldeo por extrusión. Cocción hasta 1.100 °C	Absorción de agua, resistencia mecánica a la compresión	DRX, FRX, MEB, TG	La resistencia mecánica se ve favorecida hasta un 10% de sustitución, pero siempre se da un aumento en el porcentaje de absorción de agua. No hay caracterización microestructural del material cocido.
Torres, Hernández y Paredes (2012)	Lodos de tratamiento de agua potable	Reemplazo hasta del 25% en la pasta cerámica (sustituto de arena). Cocción a 900 °C	Absorción de agua, resistencia mecánica a la compresión	DRX	Hasta un 2,5% de sustitución permite obtener resultados favorables para la fabricación de cerámicos de construcción no estructurales. No hay caracterización microestructural del material cocido
Guzmán et al. (2013a), Guzmán et al. (2013b)	Ceniza de cascarilla de arroz como reemplazo de feldespato	Conformado en prensa. Cocción entre 1.000 y 1.400 °C. Sustitución entre 11 y 22% de la materia prima	Densidad aparente, porosidad, absorción, resistencia mecánica a la flexión	MEB, DRX, FRX	Fabricación de gres porcelánico. Sustitución del 11% permite obtener unas propiedades tecnológicas similares a las obtenidas con materias primas naturales. No se estudian los cambios en la microestructura con el incremento de la temperatura

La revisión de la literatura en el entorno local dejó en evidencia la presencia de algunos trabajos realizados a nivel de pregrado, muchos de los cuales han sido desarrollados bajo la dirección del autor de este trabajo (Dorado Guerra, 2015; Vargas & Cristancho, 1986; Gómez & Mantilla, 1993; Rivera & Rodríguez, 1992; Mendoza & Mantilla, 1994). La experimentación de inquemados del carbón, así como de cenizas volantes, fue evaluada para la fabricación de ladrillos cerámicos de construcción y de tipo refractario.

Adicionalmente, se evidenciaron dos trabajos de maestría en Ciencia y Tecnología de los materiales (Portillo Rodríguez, 2015). En el primero se utilizó la cascarilla de arroz en una pasta cerámica, evaluando la conductividad del material y resistencia mecánica después de un proceso de cocción a 1.000 °C. Este trabajo en particular se llevó a cabo mediante moldeo por extrusión empleando un copolímero durante el proceso de humectación.

En el siguiente trabajo Díaz (2014) presenta los resultados obtenidos en el desarrollo de probetas prensadas conformadas con polvos cerámicos atomizados y cenizas volantes de la combustión del carbón de la central termoeléctrica Termotasajero S.A. Realizó la caracterización físico-cerámica de las muestras según norma técnica NTC y caracterización estructural mediante técnicas de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido, con el fin de validar la posibilidad de sustituir la materia prima de arcilla hasta en un 20% en peso por este subproducto de la combustión de carbón. Se evidenció que, a medida que se aumenta el contenido de ceniza, disminuyen la compactación, el grado de sinterización, las pérdidas por calcinación, la resistencia mecánica a la flexión y la compresión, y se aprecia la aparición de eflorescencias y la mejora a la abrasión profunda. El estudio revela que las mezclas más aceptables a nivel industrial serían las que tienen adiciones del 10% y 20% de cenizas volantes.

En el trabajo desarrollado en un proyecto de investigación del Grupo de Investigación en Tecnología cerámica GITEC (Sánchez & Rozo, 2013), se evaluó el comportamiento de las propiedades físico-cerámicas, mecánicas y térmicas de prototipos cerámicos fabricados con arcilla de la Formación Guayabo y residuos industriales (cisco de café, cascarilla de arroz, fibra de palma, bagazo de caña de azúcar, inquemados de carbón, cenizas volantes) en adiciones de 10% y 15%. Los especímenes fueron moldeados, secados y cocidos. Se compararon los resultados de propiedades físicas (densidad aparente, porosidad, absorción, entre otras) y mecánicas (resistencia a flexión) de los especímenes. La mezcla más óptima fue aquella con adición del 10% cisco de café, en comparación con la mezcla de 100% arcilla.

Después de haber hecho una revisión del estado del arte, se evidenció que la utilización de residuos como materia prima (nutrientes tecnológicos) presenta



potencial para la fabricación de materiales cerámicos, especialmente aquellos asociados a la industria de la construcción. Sin embargo, se evidencia también que gran parte de los trabajos no presentan resultados de correlación entre las propiedades tecnológicas obtenidas y la microestructura del cerámico elaborado. De igual forma, no se aprecian seguimientos de los cambios estructurales del material a diferentes temperaturas de cocción, sobre todo en temperaturas superiores a los 1.100 °C.

## CAPÍTULO II

# CARACTERÍSTICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS EMPLEADAS

Para la presente investigación se utilizaron cuatro tipos de nutrientes tecnológicos y material arcilloso explotado en la región por la industria cerámica regional. Los principales aspectos se presentan a continuación.

### **6. Material arcilloso**

Esta materia prima fue recolectada de la mina de explotación de una empresa cerámica, la cual se encuentra ubicada en el sector La Alejandra, jurisdicción del municipio de El Zulia, Norte de Santander (área metropolitana de Cúcuta). Son arcillas rojas de tipo sedimentario que geológicamente hacen parte del Grupo Guayabo, tal como se ha descrito en la literatura (Pedroza, 1996). La Formación Guayabo consiste en arenas de color pardo a gris claro, limolitas y arcillolitas y arcillas arenosas grises (Jeskar Ltda., 2000). Esta formación se encuentra presente en gran parte de los municipios del área metropolitana de Cúcuta.

**Figura 9. Material arcilloso proveniente de la mina y molido pasante malla 18**



## 7. Cascarilla de arroz

Este residuo fue suministrado por la empresa Arrocería Gelvez S.A.S. El cultivo de arroz es muy importante dentro de la economía regional, especialmente en el área metropolitana de Cúcuta. Los molinos de arroz locales producen una gran cantidad de este residuo, el cual es desechado en muchos casos. La figura 10 muestra el aspecto del material usado en este trabajo.

**Figura 10. Aspecto macroscópico de la cascarilla de arroz**



## 8. Cisco de café

Al igual que con el arroz, el cultivo de café es parte importante dentro de la economía regional y nacional. El endocarpio del fruto, conocido como cisco del café, es un residuo obtenido al finalizar el proceso de la trilla, etapa que da paso a la torrefacción del grano de café. El cisco suele ser usado como combustible en algunos casos; sin embargo, la cantidad empleada en la región es baja, y el resto del residuo suele ser desechado. La figura 11 muestra el aspecto del material usado en este trabajo, el cual fue adquirido de la empresa Almacafé S.A.

**Figura 11. Aspecto macroscópico del cisco de café**



## 9. Cenizas volantes de central termoeléctrica

Debido a la abundancia de carbón mineral en la región, se construyó en la zona la central termoeléctrica. Esta empresa consume gran cantidad de carbón y deja como resultado una gran cantidad de residuos de ceniza, que incluye material precipitado conocido como ceniza volante. Parte de estos residuos son usados por la industria cementera local; sin embargo, el restante no presenta ninguna aplicación significativa en la actualidad. La figura 12 muestra el aspecto del material usado en este trabajo.

**Figura 12. Aspecto macroscópico de la ceniza proveniente de termoeléctrica**



## 10. Inquemados del proceso de cocción en horno colmena en la industria cerámica regional

Las características del proceso de combustión en el horno colmena en la industria cerámica regional (alimentación manual y tamaño de grano del carbón mineral usado), así como el hecho de ser un proceso de producción por lotes, permiten la generación de un residuo rico en cenizas y carbón aún sin reaccionar, el cual por lo general va a parar a los vertederos. La figura 13 muestra el aspecto del material usado en este trabajo, el cual fue adquirido de una empresa ladrillera del sector, vía al municipio de El Zulia.

**Figura 13. Aspecto macroscópico de los quemados del horno colmena**



## 11. Proceso cerámico realizado

El proceso cerámico para el estudio de los materiales cerámicos elaborados con nutrientes tecnológicos se ha desarrollado a escala de laboratorio, empleando la técnica de extrusión como método de conformado. El tamaño de grano del nutriente tecnológico y su concentración en la pasta cerámica son variables sobre las que se ha prestado gran atención en este trabajo de investigación. Los principales aspectos del proceso cerámico realizado se presentan a continuación.

### 11.2 Formulación de pastas

La tabla 14 muestra el modelo usado para establecer la codificación para la formulación de pastas en función del tamaño de grano y la concentración del nutriente tecnológico. Este modelo no aplica en el caso de la ceniza de termoeléctrica puesto que este residuo presenta una granulometría muy fina (pasante malla 200 Tyler). Por tanto, la influencia de esta variable no será evaluada en este trabajo.

Tabla 14. Formulación de las pastas cerámicas usando nutrientes tecnológicos

Nutriente	Tamaño de grano (micrómetros)	Concentración nutriente (% peso)			
		5	10	15	20
Cascarilla de arroz	<Malla 16	CAa-5	CAa-10	CAa-15	CAa-20
	<Malla 80	CAb-5	CAb-10	CAb-15	CAb-20
	<Malla 200	CAC-5	CAC-10	CAC-15	CAC-20
Nutriente	Tamaño de grano (micrómetros)	5	10	15	20
Cisco de café	<177	CC-5	CC-10	CC-15	CC-20
Nutriente	Tamaño de grano (micrómetros)	5	10	15	20
Inquemados de carbón	<177	IC-5	IC-10	IC-15	IC-20
Nutriente	Tamaño de grano (micrómetros)	5	10	15	20
Cenizas volantes	< 177	CT-5	CT-10	CT-15	CT-20

El material arcilloso empleado presenta un tamaño de grano < malla 16 Tyler, el cual es el usado en la industria cerámica local. La reducción del tamaño de grano para el material arcilloso y los nutrientes tecnológicos se llevó a cabo en un molino de martillos rotatorio de laboratorio marca Servitech. Está compuesto por una cámara de alimentación, una cámara de molienda, un rotor y mallas intercambiables de acero inoxidable. El material que será molido se dosifica en el cono de la entrada de la cámara de alimentación y se recolecta en el recipiente de acero pintado con epóxica. El sistema de fin de carrera evita que el motor arranque con la tapa abierta, proporcionando seguridad a la hora de la limpieza.

Las materias primas fueron pesadas en una balanza OHAUS Ranger de 15 kg y luego se realizó el proceso de homogenización. Para la humectación de la pasta se tuvo en cuenta el índice de plasticidad, acorde con el método Pfefferkorn. El conformado fue realizado en una extrusora de laboratorio modelo New Wave serie 101. El equipo de extrusión lo integran una bomba de vacío, un motor, una hélice, un manómetro, un brazo de compresión, el filtro de la cámara de vacío, una manguera de conexión, camisas o cubiertas, una matriz desfibradora, boquillas y una mesa de rodillos para el corte. Se empleó un molde rectangular de 39,6 mm x 10 mm (el largo de la pieza fue ajustado en 120 mm). La figura 14 presenta un registro fotográfico del equipo empleado.

**Figura 14. Registro fotográfico de la extrusora usada para el conformado de las probetas**



Al finalizar el proceso de corte, se puso una marca de 95 mm sobre la superficie de las probetas a fin de seguir los cambios por contracción lineal durante las etapas de secado y de cocción. Las probetas se pesaron en una balanza OHAUS Adventurer.

### **11.3 Secado de las piezas cerámicas**

Las probetas conformadas fueron sometidas a secado natural por un tiempo de 24 horas. Posteriormente, se llevaron a una estufa de secado marca Franco Gabrielli Technology (ver figura 15), donde fueron sometidas a una temperatura de 110 °C por un tiempo de 24 horas. Al final del proceso se establecieron medidas de masa y cambios en la longitud de la marca puesta al finalizar la etapa de conformado.

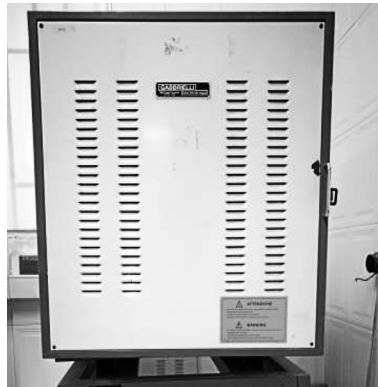
**Figura 15. Estufa de secado**



## 11.4 Cocción

El proceso se llevó a cabo en un horno mufla (calentamiento con resistencia eléctrica) marca Franco Gabbrielli Technology 50019 SestoFiorentino (ver figura 16), bajo atmósfera oxidante. La velocidad de calentamiento del horno fue de 5 °C/min. Las temperaturas de cocción fueron 950, 1.000, 1.050, 1.100, 1.150 y 1.200 °C para cada una de las pastas formuladas. La temperatura final de cocción fue mantenida por un tiempo de 120 minutos.

**Figura 16. Horno empleado para la cocción de las probetas**



Al finalizar el proceso de cocción se establecieron medidas de masa y cambios en la longitud de la marca puesta al finalizar la etapa de conformado.

## 12. Técnicas de caracterización de materiales

Se emplearon diferentes técnicas complementarias para caracterizar tanto las materias primas como las probetas cocidas.

- *Difracción de rayos X*: Fue usada para identificar y cuantificar las fases presentes en los materiales analizados. El proceso fue realizado en el laboratorio de rayos X de la Universidad Industrial de Santander. Inicialmente, la muestra fue molturada hasta lograr su paso por la malla 400 Tyler. Se usó un difractómetro de polvos, marca Bruker modelo D8 Advance con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones:
  - » Voltaje: 40 kV
  - » Corriente: 40 mA
  - » Rendija de divergencia: 0,6 mm
  - » Rendija Soller Primario: 2,5°
  - » Muestreo: 0,02035° 2Theta



- » Rango de medición: 3,5-70,0° 2Theta
- » Radiación: CuK $\alpha$ 1
- » Filtro: Níquel
- » Uso de antidisipador de aire: Sí
- » Detector lineal: LynxEye
- » Tipo de barrido: A passos
- » Tiempo de muestreo: 0,6 segundos

El análisis cualitativo se llevó a cabo al comparar los difractogramas obtenidos con los patrones de difracción PDF-2, del International Centre for Diffraction Data (ICDD). Los análisis cuantitativos de las fases encontradas se realizaron mediante el refinamiento por el método de Rietveld del perfil observado, habiéndoles agregado a los especímenes seleccionados de las muestras una cantidad conocida de un estándar interno (Aluminum oxide, Corundum,  $\alpha$ -phase), correspondiente al 20,03; 20,29; 20,05; 20,47; 20,05; 19,99; 20,11; 20,18 y 20,40% respectivamente.

- *Fluorescencia de rayos X*: Fue usada para establecer la composición química de los materiales analizados. Los análisis cuantitativos se realizaron mediante el método Quant-Express (parámetros fundamentales) en el rango de sodio (Na) a uranio (U), en un espectrómetro secuencial de fluorescencia de rayos X de longitud de onda dispersiva de 4 kW marca Bruker, modelo S8 TIGER, con las siguientes características para la medida:
  - » Tipo de detector: centelleo (elementos pesados) y flujo (elementos livianos).
  - » Fuente de rayos X: tubo de rodio (Rh).
  - » Goniómetro: de alta precisión para ángulos theta y 2 theta.

El valor de las pérdidas por ignición (LOI) fue determinado mediante la calcinación de los especímenes seleccionados de las muestras con una velocidad de calentamiento de 3,08 °C/min hasta una temperatura de 950 °C, manteniendo dicha temperatura durante dos horas.

- *Análisis térmico gravimétrico/calorimetría diferencial de barrido*: Fue usada para caracterizar las materias primas e identificar fases y eventos exotérmicos/endotérmicos. Se usó un equipo SDT-600, empleando una velocidad de calentamiento de 20 °C/min y una atmósfera de aire con un flujo de 100 ml/min. Aproximadamente 15 mg de muestra (pasante malla 80 Tyler) fueron usados para la prueba. Crisoles de alúmina fueron usados para cargar la muestra y como referencia.

- *Microscopia electrónica de barrido*: Fue usada para establecer aspectos morfológicos de las materias primas. Se empleó un detector de energía dispersiva de rayos X acoplado al microscopio para establecer aspectos microquímicos de las muestras. El equipo utilizado fue un microscopio FESEM, MERLIN de Carl Zeiss, con capacidad analítica EDX y WDX de Oxford. Este es un sistema de ultra alta resolución que permite trabajar con todo tipo de muestras tanto en imagen como en análisis. Las muestras fueron recubiertas con oro para su análisis.

### **13. Normas usadas para el establecimiento de las propiedades tecnológicas**

Las medidas de contracción en secado y cocción fueron hechas siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C326-03 (Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays). La medida de longitud fue realizada con un calibrador digital.

El establecimiento del porcentaje de absorción de agua fue establecido siguiendo el procedimiento establecido en la norma técnica colombiana NTC 4321-3 para baldosas cerámicas (Parte 3: Método de ensayo para determinar la absorción de agua, porosidad aparente, densidad relativa aparente y densidad aparente).

La resistencia mecánica a la flexión (y el módulo de rotura) fue realizada siguiendo el procedimiento de la norma técnica colombiana NTC 4321-4 (Parte 4: Método de ensayo para determinar el módulo de rotura y la resistencia a la flexión), usando un equipo de laboratorio marca Gabbrielli.

Para las medidas de conductividad térmica se usó la técnica experimental de flujo lineal transitorio de calor (alambre caliente), empleando el sistema KD2-Pro Thermal Properties Analyzer de Decagon Devices, Inc. Consiste en dos agujas de acero inoxidable de 3 mm de longitud y 1,4 mm de diámetro separadas 6 mm: una funciona como fuente de calor y la otra como sensor de temperatura. Dicho sensor cumple con las especificaciones de la norma IEEE 442- 1981 y ASTM D5334-00. A cada probeta se le toman cinco lecturas, con una diferencia de tiempo entre cada medición de 5 min.

### **14. Metodología para la selección de la pasta de mejor comportamiento**

El proceso consiste en la comparación de los valores numéricos obtenidos para las diferentes propiedades tecnológicas analizadas en relación con valores propuestos en la literatura que definen la aplicabilidad del cerámico. Se analizaron las ventajas y desventajas de cada material, y luego se seleccionó el nutriente que presentó

las mayores ventajas para realizar el proceso de correlación entre las propiedades tecnológicas y la estructura y morfología del cerámico a las diferentes temperaturas de cocción. Se eligió el nutriente tecnológico con el mejor comportamiento en las propiedades tecnológicas analizadas (incluyendo el efecto de la granulometría) para este proceso.

El proceso comparativo se realizó a través de la elaboración de pruebas de TG/DSC de la pasta cerámica actual y la pasta modificada. Se analizaron los flujos de calor de los dos materiales (empleando masas muy similares para el ensayo) a fin de evidenciar si había variaciones en los eventos endotérmicos durante la cocción. De igual forma se buscó evidenciar si había eventos de tipo exotérmico que pudieran aportar calor al sistema. El análisis de información fue mayoritariamente de tipo cualitativo, ya que no hubo una buena discriminación de los eventos térmicos que permitiesen realizar el proceso matemático de integración del área bajo la curva para el cálculo del calor endotérmico/exotérmico evidenciado en el perfil de DSC.

## CAPÍTULO III

# CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

### 15. Arcilla La Alejandra

Se empleó esta arcilla roja de la Formación Guayabo debido a que la arcilla gris de la Formación León, por su distribución granulométrica, es muy plástica, pues posee un bajo porcentaje de arena y presenta unas contracciones en secado más bajas en comparación con la arcilla roja para las dos técnicas de conformado analizadas (Gelves *et al.*, 2013). A su vez, la arcilla roja se encuentra en mayor abundancia y su costo es menor.

**Figura 17. Mina donde se realizó la explotación del mineral arcilloso**



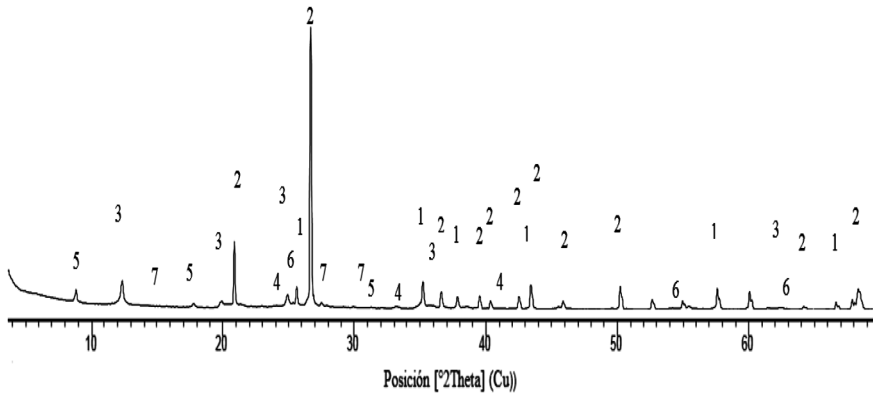
#### 15.1 Localización del material arcilloso

El material arcilloso está localizado en el municipio El Zulia, vereda La Alejandra, departamento de Norte de Santander. Esta zona comprende un área de 13.162 ha. Los linderos del predio minero se encuentran dentro de la plancha número 87 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (Mora, 2015).

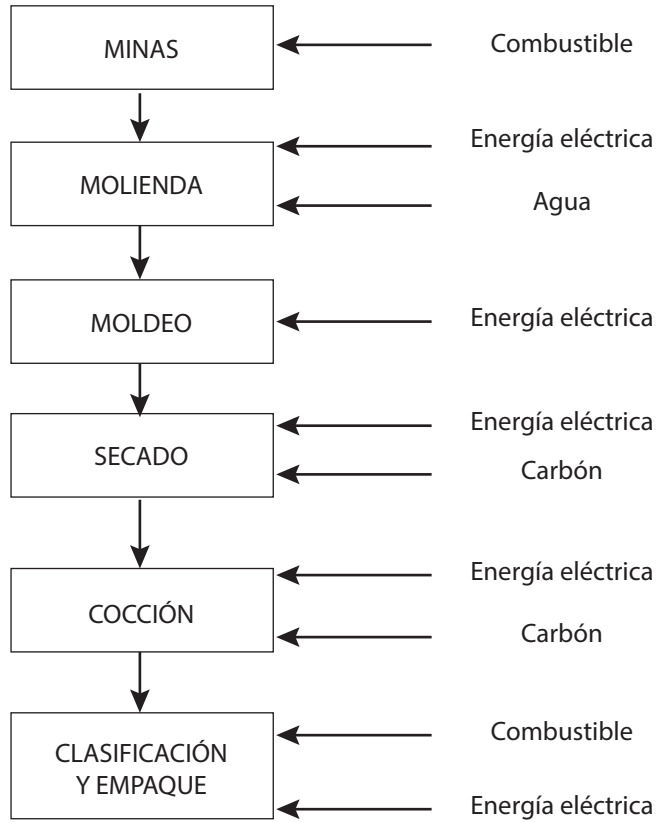
Este terreno es apto para la ejecución de las labores de explotación necesarias de la materia prima arcillosa para su posterior beneficio en la planta de procesamiento. Cuenta con una vía de acceso en buen estado, así como con un frente de explotación de 250 m apropiado para la extracción de la arcilla. También se ha adecuado un sitio especial para el depósito de estériles como el producido en la operación de descapote y preparación del frente de explotación, así como las capas de arenisca que suprayacen a los mantos arcillosos, cumpliendo de esta manera parte importante de la normatividad ambiental vigente (Lombana, 2011).

## 15.2 Caracterización estructural

Como se expresó en la metodología, este proceso se realizó mediante difracción de rayos X. En la figura 18 se presenta el patrón de difracción obtenido y en la tabla 15 se muestra el análisis cuantitativo realizado mediante refinamiento Rietveld.



1) corindón; 2) cuarzo; 3) caolinita; 4) hematita; 5) moscovita; 6) anatasa; 7) feldespato potásico (microclina)

**Figura 18. Patrón de difracción de rayos X de la muestra arcillosa****Tabla 15. Composición estructural del material arcilloso**

	Fase	N.º Tarjeta PDF-2	Nombre	Cuantitativo (en % peso)
Cristalino	SiO <sub>2</sub>	000-85-0796	Cuarzo	47,4
	KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	000-84-1302	Moscovita	10,7
	TiO <sub>2</sub>	000-71-1166	Anatasa	0,4
	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	000-89-6538	Caolinita	14,4
	Ca(CO <sub>3</sub> )	000-86-2342	Calcita	N.C.
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	000-85-0599	Hematita	1,1
	CaO <sub>2</sub> (Al, Mg)- Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	000-13-0135	Montmorillonita	N.C.
	K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	000-72-1114	Microclina	0,9

Fase	N.º Tarjeta PDF-2	Nombre	Cuantitativo (en % peso)
Total cristalino			74,9
Amorfos y otros			25,1

De la tabla 15 se puede apreciar que la fase predominante en el material arcilloso es el cuarzo. En relación con las fases arcillosas, sobresale la presencia de la caolinita y de la moscovita dentro del grupo de las micas, y montmorillonita aparece como fase traza. Esta clase de filosilicatos permitirá tener un comportamiento particular de las fases formadas a alta temperatura, lo cual podría arrojar resultados diferentes a los reportados en la literatura.

### 15.3 Caracterización química

La composición química del material arcilloso es presentada en la tabla 16, la cual fue realizada mediante fluorescencia de rayos X.

Tabla 16. Composición química del material arcilloso (FRX)

Elemento	Número atómico (Z)	Concentración (peso)	Óxido	Concentración (% peso)
Si	14	30,69%	SiO <sub>2</sub>	65,66
Al	13	9,37%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,71
Fe	26	4,01%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,74
K	19	1,33%	K <sub>2</sub> O	1,60
Ti	22	0,55%	TiO <sub>2</sub>	0,91
Mg	12	0,43%	MgO	0,71
P	15	0,27%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,62
Ca	20	0,24%	CaO	0,34
Na	11	0,10%	Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14
Ba	56	0,04%	BaO	0,05
Zr	40	0,03%	ZrO <sub>2</sub>	0,04
V	23	0,02%	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04
Cu	29	0,02%	CuO	0,03
Zn	30	0,02%	ZnO	0,03
Mn	25	0,02%	MnO	0,02
Sr	38	0,01%	SrO	0,01
Cr	24	0,01%	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01
		---	* LOI	6,28

\*LOI = *Loss On Ignition* (los especímenes seleccionados de las muestras fueron calcinados a 950 °C durante dos horas para determinar las pérdidas por ignición).

Los resultados de composición química se correlacionan bastante bien con el resultado mineralógico. El alto contenido de silicio está asociado a la presencia de cuarzo en el material, así como de filosilicatos y de feldespato potásico. El aluminio se relaciona con la presencia de estos dos grupos de minerales.

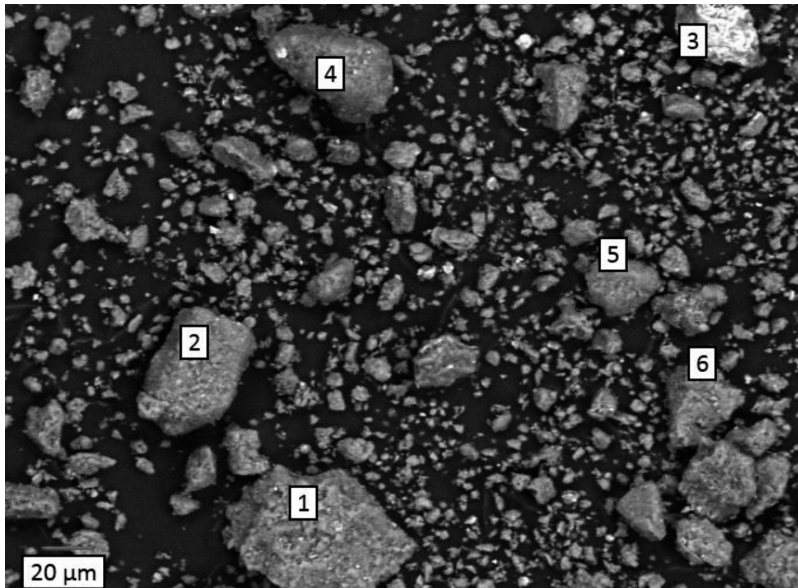
El hierro se encuentra asociado a la presencia de hematita en el material; también podría estar presente en la estructura del feldespato y de los filosilicatos. El potasio se correlaciona con la presencia de moscovita y de feldespato potásico. El óxido de titanio aparentemente está relacionado con la presencia de anatasa o en su defecto de la fase rutilo.

La presencia de magnesio y calcio puede asociarse a la moscovita. Sin embargo, también podría estar relacionada con la presencia de caliza en la muestra. El porcentaje de pérdidas por calcinación no es muy alto y se atribuye a la pérdida de agua adsorbida físicamente y a la deshidroxilación de los minerales filosilicatos.

#### 15.4 Aspectos morfológicos y microquímica

Estos aspectos fueron realizados mediante microscopía electrónica de barrido, con un detector de energía dispersiva de rayos X acoplado. Los resultados obtenidos son presentados en la figura 19 y en la tabla 17.

Figura 19. Microfotografía (MEB) del material arcilloso





Los resultados de la micrografía superior (figura 19) muestran los aspectos morfológicos de la muestra arcillosa. Se aprecia una granulometría muy variada, con granos entre 200  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$  aproximadamente. Un valor promedio de grano podría estar en torno a los 40  $\mu\text{m}$ . Los granos parecen ser el producto de la aglomeración de partículas más pequeñas.

Las imágenes mostradas han sido elaboradas con la ayuda del detector de electrones retrodispersos. Este hecho permitió observar el contraste de los elementos pesados y livianos presentes en la muestra observada. Se evidencian en la imagen algunas regiones más brillantes que corresponden a la acumulación de los elementos más pesados. Estas regiones aparentemente se ubican en la superficie de algunos granos.

La información microquímica de las seis regiones que se aprecian en la figura 19 se ha consolidado en la tabla 17.

**Tabla 17. Microquímica de algunos granos presentes en el material arcilloso (% atómico)**

Elemento	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	Sitio 5	Sitio 6
O	69,79	68,60	59,96	69,84	51,79	63,08
Na	0,23	0,24	---	0,23	---	---
Mg	0,37	0,40	1,02	0,35	0,30	0,24
Al	8,49	9,81	2,75	6,91	7,79	5,67
Si	19,22	19,50	10,53	21,42	38,88	28,74
S	---	---	---	---	0,20	---
K	0,70	0,60	0,21	0,52	0,54	0,96
Mn	---	---	0,15	---	---	---
Ti	0,20	0,16	---	0,11	---	0,55
Fe	0,99	0,70	25,38	0,62	0,51	0,76

De la información de la tabla 17 se puede destacar lo siguiente:

- El elemento pesado que resalta en la micrografía de MEB se trata de hierro, muy posiblemente presente en alguna fase en forma de óxido debido a la alta concentración de Fe y O en el resultado del sitio 3.
- Con excepción del sitio 3, los resultados microquímicos son muy característicos de compuestos aluminosilicatos, como las arcillas y los feldespatos.
- La presencia de hierro es evidente en todos los granos analizados. En el sitio 3 este elemento está más concentrado (sitios brillantes de la imagen), posiblemente asociado a fases óxido. En los demás análisis este elemento puede estar formando parte de la estructura de las fases del tipo aluminosilicatos

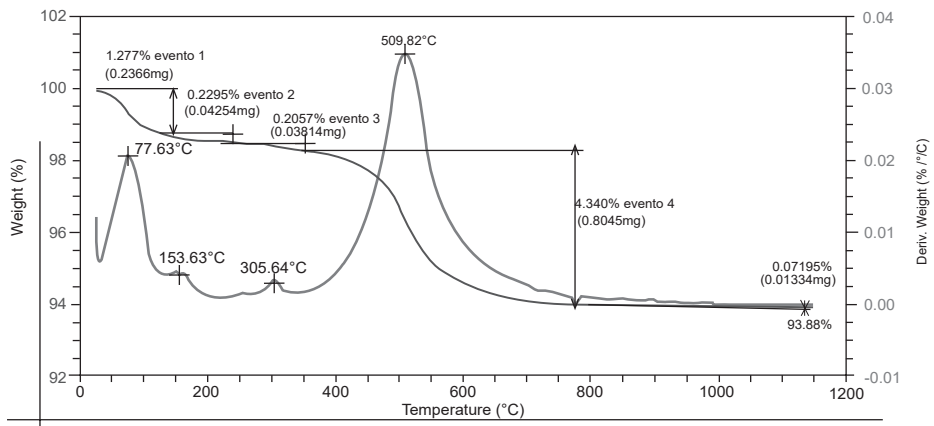
o como catión de intercambio en arcillas/micas, lo cual podría explicar su dispersión en los granos. La presencia de este elemento puede favorecer la fusión del material y modificar el color de la pieza cerámica.

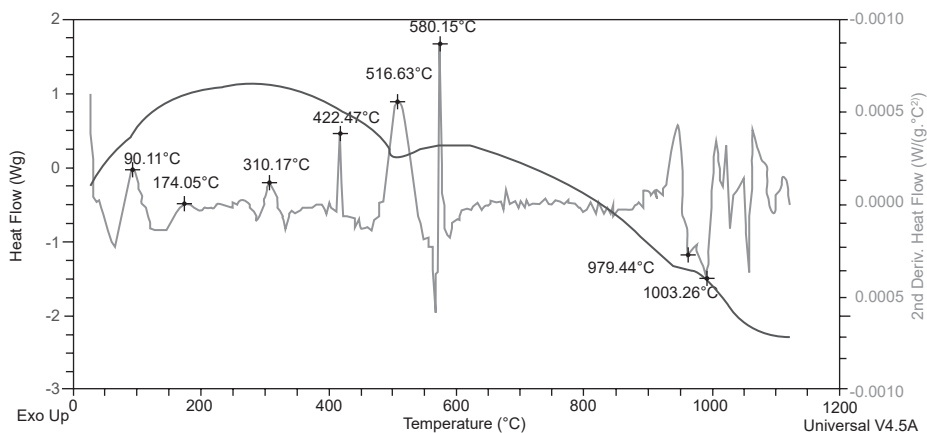
- La presencia de azufre en la muestra (sitio 5) podría llegar a ser un problema en las características estéticas del material cerámico (eflorescencias). El reporte de composición química volumétrica obtenido por FRX muestra que la concentración de este elemento es baja; por tanto, existe un bajo riesgo de aparición de eflorescencias.

## 15.5 Análisis termogravimétrico/calorimetría diferencial de barrido

Las figuras 20 y 21 presentan los resultados del análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido.

**Figura 20. Perfiles TG y DTG del material arcilloso (atmósfera de aire)**



**Figura 21. Perfil DSC del material arcilloso (atmósfera de aire)**

En relación con la figura 20, se puede observar la presencia de diferentes eventos de pérdida de masa en el rango de temperatura establecido. La pérdida de masa presente en 510 °C (evento 4) está asociada a la deshidroxilación de la fase caolinita en el material (ver también resultado de DRX) (Smykatz-Kloss, 1974). Con base en el perfil de deshidratación de la caolinita (DTG), es posible clasificar esta fase como una caolinita extremadamente desordenada, acorde con lo expresado por Smykatz-Kloss (1974).

Haciendo uso de la fórmula ideal de la caolinita  $(Al_2Si_2O_5)(OH)_4$  es posible inferir la concentración de esta fase en el material analizado, tomando como base la concentración másica de los grupos OH en la fórmula ideal (26,3%). 0,8045 mg fue la cantidad de masa eliminada (medida por DTG) en el proceso de deshidroxilación, es decir, este valor corresponde al 26,3% de la masa de la caolinita. Por tanto, la masa total aproximada presente de caolinita será de 3,059 mg. Si la masa total empleada en el análisis fue de 18,58 mg, entonces la concentración másica de caolinita en dicho material será de aproximadamente de 16,5%.

Este valor obtenido es bastante cercano al obtenido por refinamiento Rietveld. Sin embargo, es importante resaltar que la cantidad de masa usada en el análisis térmico es menos representativa en relación con la usada mediante la técnica de DRX. Además de ello, podrían existir contribuciones de deshidroxilación de filosilicatos del grupo de las micas en el mismo rango de temperaturas. La illita, por ejemplo, presenta una estructura cristalina muy similar a la moscovita, con deshidroxilación en este rango de temperaturas; por tanto, se podría pensar que esta fase está presente en el material arcilloso utilizado (Smykatz-Kloss, 1974; Földvári, 2011).

La pérdida de masa a baja temperatura (77 °C) muy probablemente se trate de agua higroscópica absorbida en el material (Smykatz-Kloss, 1974; Földvári, 2011). Los pequeños eventos de pérdida de masa en 154 y 305 °C (eventos endotérmicos) podrían estar asociados a la presencia de diferentes minerales. Así, el primero de ellos puede llegar a relacionarse con trazas de montmorillonita en el material, y el segundo, con compuestos hidratos de hierro como la goethita o la lepidocrocita (Smykatz-Kloss, 1974; Földvári, 2011). En este último caso la existencia de dicha fase podría llegar a explicar las discrepancias en cuanto al contenido de hierro presentado en la composición mineralógica (Tabla 15) y su composición química (Tabla 16).

El perfil de segunda derivada del flujo de calor (figura 21) permitió identificar un evento endotérmico en 580 °C, el cual muy probablemente esté asociado a la transformación del cuarzo de la fase alfa a la fase beta (Smykatz-Kloss, 1974; Földvári, 2011). Este resultado guarda correlación con el análisis de fases realizado por DRX.

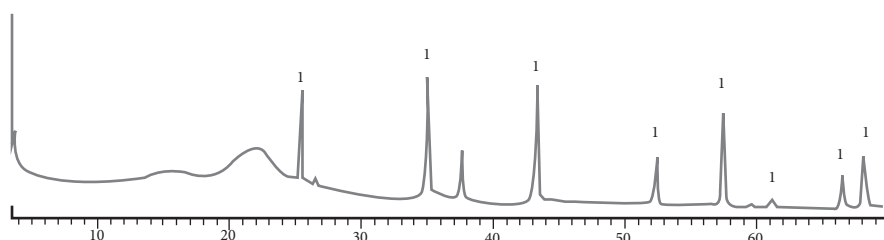
Dos eventos exotérmicos se aprecian a 979°C y 1003°C en la figura 21. Estos pueden estar asociados a la cristalización de metacaolinita (fase obtenida después del proceso de deshidroxilación de la caolinita) a una fase tipo espinela, la cual contribuirá posteriormente a la formación de mullita primaria (Smykatz-Kloss, 1974; Földvári, 2011; Ramírez, 2012; Ríos, 2009).

## 16. Cascarilla de arroz

### 16.1 Caracterización estructural

Los resultados de caracterización mediante difracción de rayos X se presentan en la figura 22 y en la tabla 18.

Figura 22. Patrón de difracción de rayos X de la cascarilla de arroz



1) corindón; 2) cuarzo

**Tabla 18. Composición estructural de la cascarilla de arroz (% peso)**

Fase		N.º Tarjeta PDF-2	Nombre	Cuantitativo (%)
Cristalino	SiO <sub>2</sub>	000-85-0796	Cuarzo	0,2
Total cristalino				0,2
Amorfos y otros				99,8

El proceso de refinamiento Rietveld del patrón de difracción de rayos X, presentado en la tabla 18, deja ver que este material se caracteriza por ser amorfo casi en su totalidad. Solo el cuarzo aparece como fase cristalina, pero su concentración es muy baja.

## 16.2 Caracterización química

Los resultados de fluorescencia de rayos X son presentados en la tabla 19.

**Tabla 19. Composición química de la cascarilla de arroz**

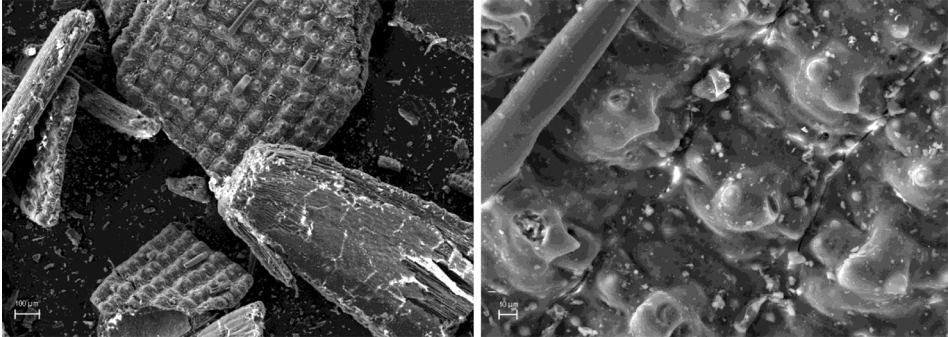
Elemento	Número atómico (Z)	Concentración (% peso)	Óxido	Concentración (% peso)
Si	14	7,27%	SiO <sub>2</sub>	15,56
K	19	0,23%	K <sub>2</sub> O	0,28
Al	13	0,11%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20
P	15	0,07%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,15
Ca	20	0,06%	MgO	0,09
Mg	12	0,05%	MgO	0,09
Fe	26	0,04%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06
Mn	25	0,01%	SO <sub>3</sub>	0,03
S	16	0,01%	MnO	0,02
		---	LOI	83,50

De la tabla 19 se puede apreciar que solo 16,5% del peso de la cascarilla corresponde a fase inorgánica; el valor restante está asociado a la materia orgánica y al agua adsorbida en el material (ver análisis térmico). El silicio es el elemento más representativo de la fracción inorgánica, acorde con la tabla 19; por tanto, al correlacionar este valor con el resultado de análisis estructural se podría pensar que la fase amorfa está enriquecida en este elemento. Esta fase, al estar presente en la pasta cerámica, podría interactuar con el material arcilloso, lo que ocasiona cambios estructurales en el cerámico en altas temperaturas de cocción.

### 16.3 Caracterización morfológica

Los principales aspectos morfológicos de la cascarilla de arroz son presentados en la figura 23.

Figura 23. Microfotografías (MEB) de la cascarilla de arroz

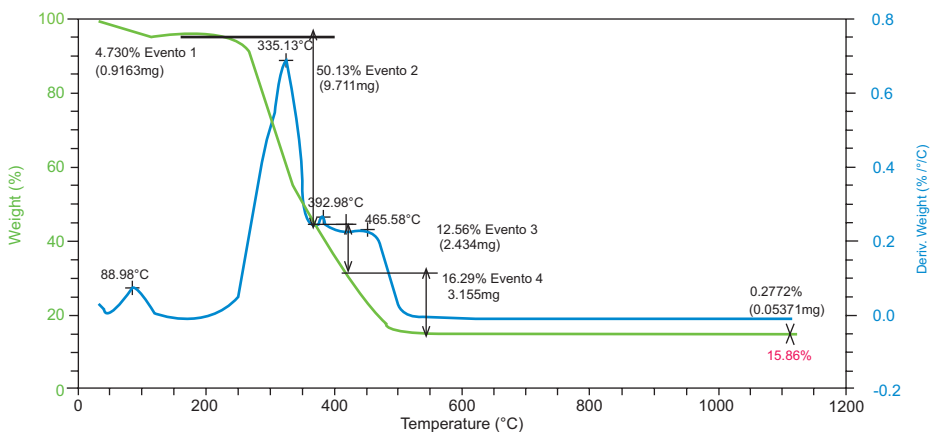


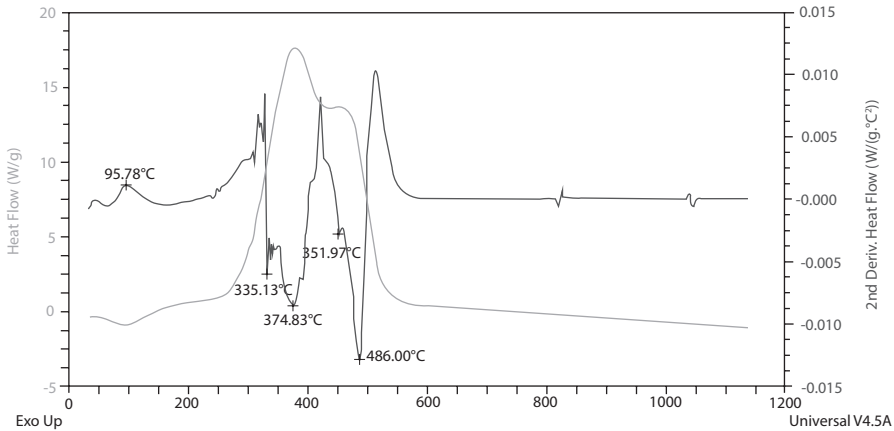
La morfología de la cascarilla de arroz parece ser de tipo fibroso, cuya agrupación conlleva a la formación de granos de tipo laminar posterior al proceso de molturación. El tamaño de las partículas es muy variada: se evidencian granos entre 300 y 700 micrómetros. Este tamaño de grano observado en la imagen podría afectar las propiedades tecnológicas del material cerámico obtenido. De aquí la importancia de analizar el efecto del tamaño de grano de este material en la pasta cerámica.

### 16.4 Caracterización termogravimétrica/calorimétrica

Las figuras 24 y 25 presentan los resultados del análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido.

Figura 24. Perfiles TG y DTG de la cascarilla de arroz (atmósfera de aire)



**Figura 25. Perfil DSC de la cascarilla de arroz (atmósfera de aire)**

En el perfil DTG de la figura 24 se pueden apreciar cuatro eventos de pérdida de masa. El primero de ellos (cerca de 89 °C) usualmente está asociado a la pérdida de humedad presente en el material. El pico observado en 335 °C (segundo evento) presenta una forma asimétrica, lo que podría indicar que hay más de un evento de pérdida de masa, probablemente la descomposición de hemicelulosa y celulosa. El tercer evento y el cuarto evento podrían tratarse de la descomposición de lignina (Gómez, Hincapié & Rivera, 2011). La pérdida total de masa fue de 84,14%, valor muy similar al obtenido en las pérdidas de calcinación presentado en la tabla 16 (FRX).

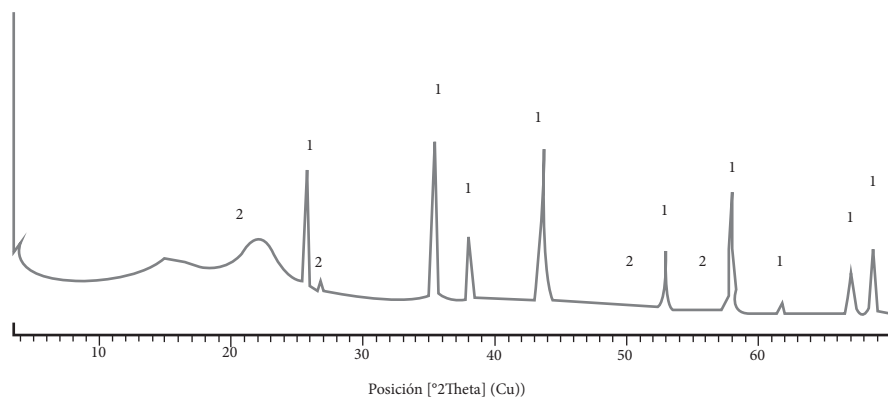
En relación con el perfil de DSC (figura 25, segunda derivada), un solo evento endotérmico fue evidenciado (96 °C). Este posiblemente está asociado al calor requerido para evaporar el agua presente en la cascarilla de arroz. Diferentes eventos exotérmicos se evidencian en el perfil de la figura 25 en el rango comprendido entre 300 y 550 °C. Estos eventos estarían relacionados con la oxidación de la materia orgánica presente en la cascarilla. No se evidencian eventos exotérmicos significativos en altas temperaturas que indiquen procesos de recristalización en el material.

## 17. Cisco de café

### 17.1 Caracterización estructural

Para este material se llevó a cabo un proceso similar al de la cascarilla de arroz. Los resultados son presentados en la figura 26 y en la tabla 20.

Figura 26. Patrón de difracción del cisco de café



1) corindón; 2) cuarzo

Tabla 20. Composición estructural del cisco de café

Fase		N.º Tarjeta PDF-2	Nombre	Cuantitativo (%)
Cristalino	SiO <sub>2</sub>	000-85-0796	Cuarzo	0,4
Total cristalino				0,4
Amorfos y otros				99,6

Según la tabla 20, este material es prácticamente amorfo, presenta pequeñas trazas de cuarzo.

## 17.2 Caracterización química

El resultado del análisis de fluorescencia de rayos X es presentado en la tabla 21.

Tabla 21. Composición química del cisco de café

Elemento	Número atómico (Z)	Concentración (% peso)	Óxido	Concentración (% peso)
Si	14	0,29%	SiO <sub>2</sub>	0,62
K	19	0,20%	K <sub>2</sub> O	0,24
Ca	20	0,17%	CaO	0,24
Mg	12	0,14%	MgO	0,24
Al	12	0,14%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,17
S	16	0,05%	SO <sub>3</sub>	0,11
Fe	26	0,03%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07



Elemento	Número atómico (Z)	Concentración (% peso)	Óxido	Concentración (% peso)
P	15	0,03%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05
		---	LOI	98,24

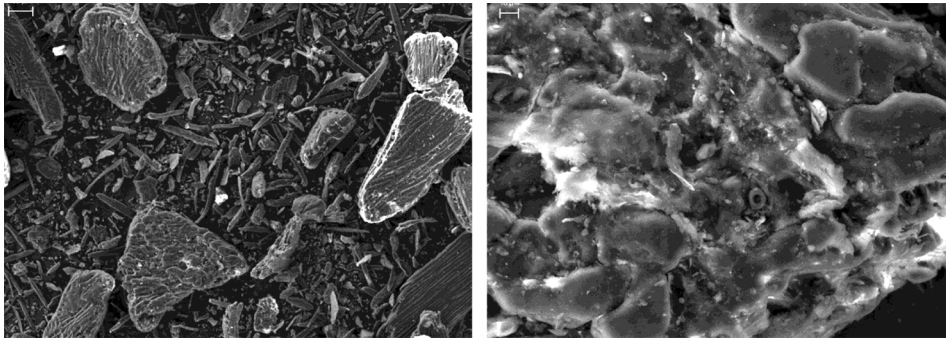
Este material se caracteriza por tener un muy alto contenido de fase orgánica acorde con las pérdidas de calcinación observadas en la tabla 21. Respecto al material residual (ceniza), se observa una alta concentración de elementos alcalinos y alcalinotérreos. La presencia de estos elementos podría favorecer el proceso de vitrificación cuando se haga sustitución parcial del material arcilloso.

Como aspecto por resaltar está la presencia de azufre en la ceniza obtenida. Este hecho podría llegar a tener un efecto negativo si el elemento llega a reaccionar para dar paso a la formación de sulfatos a nivel de superficie. Aun así, el riesgo es bajo debido a la baja cantidad de fase sólida que queda como ceniza.

### 17.3 Caracterización morfológica

Las principales características morfológicas del cisco son presentadas en la figura 27.

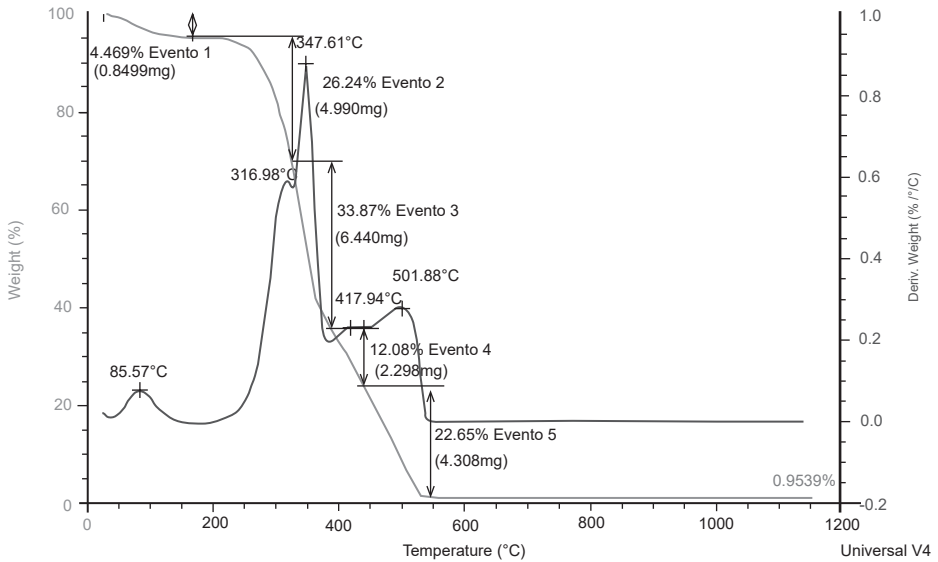
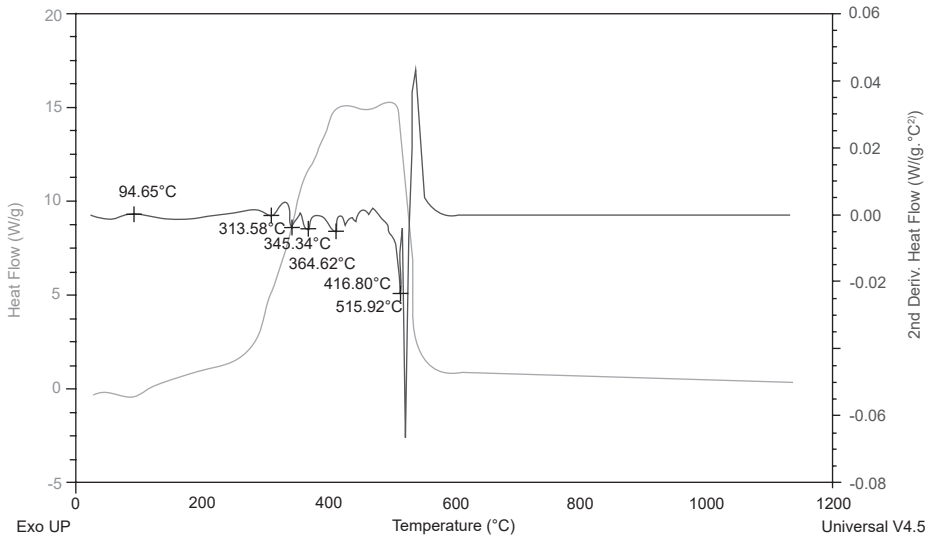
Figura 27. Microfotografías (MEB) del cisco de café



En la figura 27 se evidencian dos tipos de morfologías. La primera de ellas es de aspecto alargado, con un largo no mayor a los 150  $\mu\text{m}$  y un ancho no mayor a 60  $\mu\text{m}$ . La segunda presenta partículas que varían entre 300 y 500  $\mu\text{m}$ . La presencia de estos granos de mayor tamaño puede llegar a afectar la resistencia mecánica después de la oxidación de la materia orgánica.

### 17.4 Caracterización termogravimétrica/calorimétrica

Las figuras 28 y 29 presentan los resultados del análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido.

**Figura 28. Perfiles TG y DTG del cisco de café (atmósfera de aire)****Figura 29. Perfil DSC del cisco de café (atmósfera de aire)**

El resultado del TG/DSC del cisco de café (figuras 28 y 29) presenta mucha similitud al obtenido para la cascarilla de arroz. En el perfil TG se observan eventos asociados a la presencia de hemicelulosa, celulosa y lignina reportados para este material (Manals-Cutiño, Penedo-Medina & Giralt-Ortega, 2011). Estas fases representan la gran mayoría del material acorde con las pérdidas de calcinación obtenidas (aproximadamente el 99%). Un aspecto diferenciador del cisco de café

en comparación con la cascarilla de arroz se aprecia en el perfil de flujo de calor. Se observa que en este caso el mayor evento exotérmico se da arriba de los 500 °C, posiblemente asociado a una mayor concentración de lignina en este residuo. No se evidencian eventos exotérmicos significativos en altas temperaturas que indiquen procesos de recristalización en el material.

## 18. Cenizas volantes

### 18.1 Caracterización estructural

Los resultados de caracterización estructural mediante difracción de rayos X son presentados en la figura 30 y en la tabla 22.

1) corindón; 2) cuarzo; 3) mullita; 4) hematita

Figura 30. Patrón de difracción de la ceniza volante

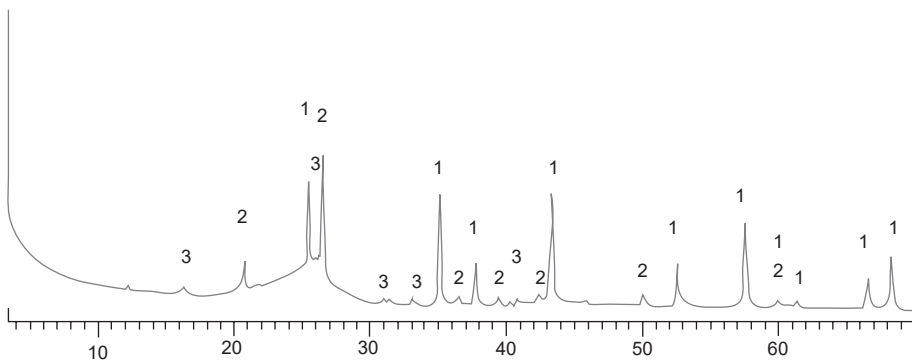


Tabla 22. Composición estructural de la ceniza volante de termoelectrica

Fase	N.º Tarjeta PDF-2	Nombre	Cuantitativo (%)	
Cristalino	SiO <sub>2</sub>	000-78-1252	Cuarzo	5,9
	SiO <sub>2</sub>	000-89-8937	Cuarzo	6,0
	Al <sub>4.59</sub> Si <sub>1.41</sub> O <sub>9.7</sub>	000-79-1455	Mullita	23,4
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	010-73-0603	Hematita	1,9
Total cristalino			37,2	
Amorfos y otros			62,8	

Los resultados de caracterización estructural de la tabla 22 dejan ver que la ceniza volante contiene tanto material cristalino como amorfo, siendo este último el de mayor representatividad. Dentro del grupo de fases cristalinas resalta la mullita

como compuesto mayoritario. En menor grado se evidencia la presencia de cuarzo y de hematita.

## 18.2 Composición química

El resultado del análisis de fluorescencia de rayos X es presentado en la tabla 23.

**Tabla 23. Composición química de la ceniza volante de termoeléctrica**

Elemento	Número atómico (Z)	Concentración (peso)	Óxido	Concentración (% peso)
Si	14	24,70%	SiO <sub>2</sub>	52,85
Al	13	13,90%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,27
Fe	26	5,44%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,77
K	19	1,09%	K <sub>2</sub> O	1,31
Ca	20	0,83%	CaO	1,17
Ti	22	0,70%	TiO <sub>2</sub>	1,16
Mg	12	0,39%	MgO	0,65
P	15	0,25%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,56
Na	11	0,16%	Na <sub>2</sub> O	0,26
S	16	0,11%	SO <sub>3</sub>	0,21
Ba	56	0,10%	BaO	0,11
V	23	0,06%	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,11
Cu	29	0,03%	CuO	0,04
Zn	30	0,03%	ZnO	0,04
Zr	40	0,02%	ZrO <sub>2</sub>	0,03
Sr	38	0,02%	SrO	0,02
Ni	28	0,02%	NiO	0,02
Mn	25	0,01%	MnO	0,02
		---	LOI	7,36

El resultado de composición química presentado en la tabla 23 deja ver que el silicio es el elemento predominante en el material. Este elemento, además de estar en el cuarzo y en la mullita, podría estar presente en la composición de la fase amorfa del material.

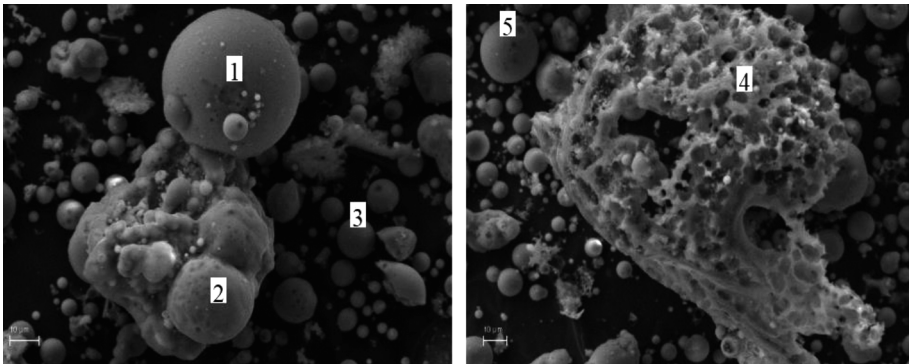
El resultado del análisis químico se correlaciona bastante bien con los resultados de composición estructural. Los óxidos fundentes posiblemente están dentro de la fase amorfa, tal como se podrá apreciar en los resultados de microquímica hechos

por EDX. Es importante evaluar el efecto que puede tener la presencia de azufre de la ceniza sobre las propiedades estéticas del cerámico obtenido.

### 18.3 Caracterización morfológica y microquímica

Las principales características morfológicas de la ceniza volante son presentadas en la figura 31.

**Figura 31. Microfotografías (MEB) de la ceniza volante**



Este tipo de compuesto se caracteriza por la presencia de dos tipos de morfologías (ver figura 31). La primera de ellas incluye partículas de tipo esférico, con diámetros entre 1 y 40  $\mu\text{m}$ . La segunda manifiesta partículas de mayor tamaño de aspecto poroso entre 50 y 150  $\mu\text{m}$ . Se evidencia sinterización entre algunas partículas. El consolidado de las medidas microquímicas (cinco medidas) se presenta en la tabla 24.

**Tabla 24. Microquímica de algunas partículas presentes en la ceniza volante (% atómico)**

Elemento	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	Sitio 5
O	68,78	71,69	68,37	67,61	67,56
Na	---	0,22	0,42	---	0,18
Mg	0,28	0,27	0,38	---	0,29
Al	9,13	12,42	8,15	12,68	10,89
Si	15,29	14,39	18,74	16,68	18,41
S	---	---	---	1,30	---
K	0,38	0,29	0,93	0,33	0,41
Ca	---	---	0,13	0,21	0,46
Ti	0,11	0,23	0,27	0,33	0,35

Elemento	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	Sitio 5
Fe	6,03	0,48	2,62	0,85	1,36
Cu	---	---	----	---	0,08

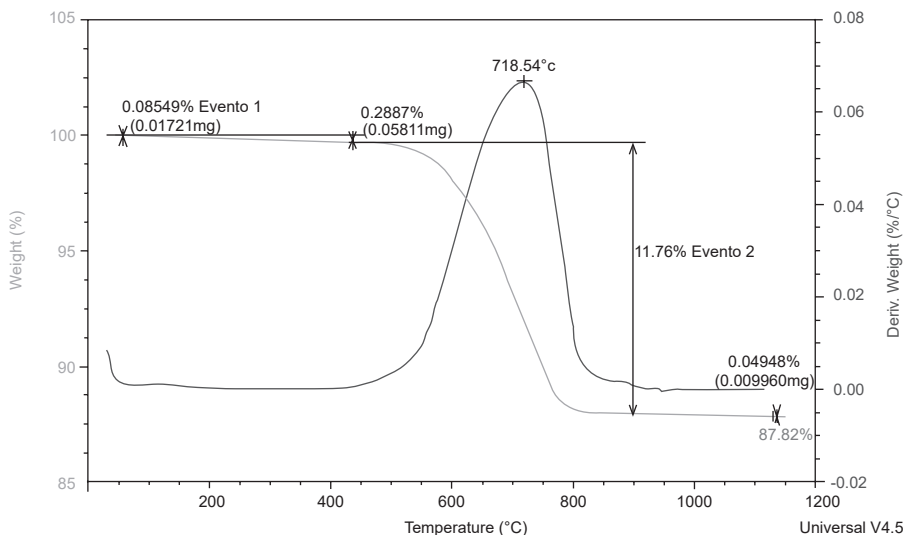
Sobre la microquímica de la ceniza volante se puede concluir:

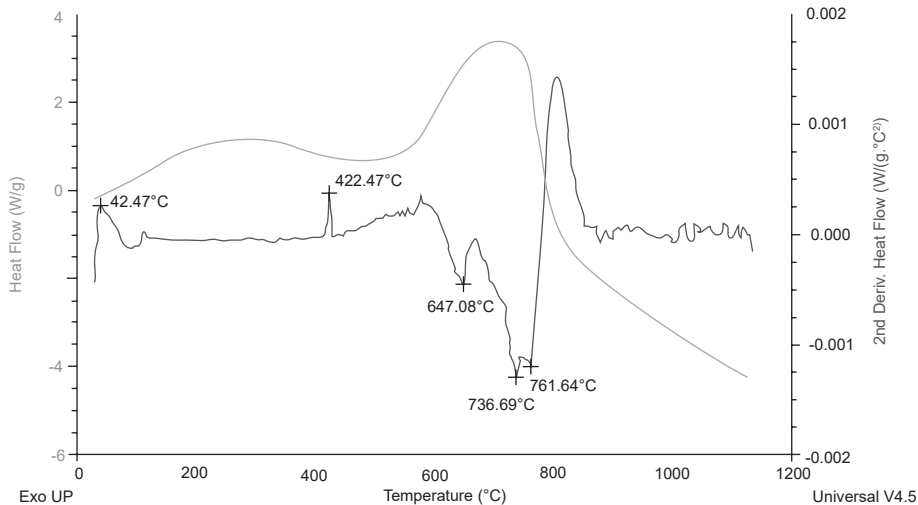
- El material se caracteriza por el predominio de oxígeno, silicio y aluminio. Este resultado presenta correlación con los datos obtenidos por FRX.
- No se evidencia algún patrón químico que permita inferir la presencia de más de una fase sólida. Posiblemente hay fase amorfa/vítrea.
- Es de interés la presencia de elementos alcalinos que puedan favorecer el proceso de fusión al utilizar la ceniza como materia prima en la pasta cerámica.
- Al igual que por FRX, se identificó la presencia de azufre en algunas partículas. Es importante evaluar el efecto de este elemento en la formación de eflorescencias.
- El cobre solo aparece en uno de los análisis, y su concentración es muy baja. Podría considerarse como un elemento traza, acorde con el resultado de FRX.

## 18.4 Caracterización termogravimétrica/calorimétrica

Las figuras 32 y 33 presentan los resultados del análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido.

**Figura 32. Perfiles TG y DTG de la ceniza volante (atmósfera de aire)**



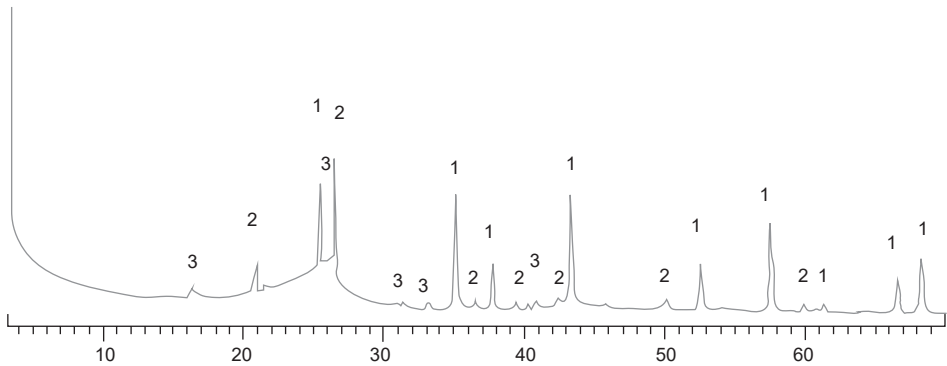
**Figura33. Perfil DSC de la ceniza volante (atmósfera de aire)**

El perfil TG de la ceniza volante (figura 32) muestra la presencia de solo dos eventos de pérdida de masa. El primero de ellos debajo de los 100 °C, posiblemente agua físicamente adsorbida en el material, y el segundo en 718 °C, probablemente asociado a carbono residual que no reaccionó durante el proceso de combustión (12% aproximadamente). Estas afirmaciones tienen su respaldo en la discriminación entre eventos endotérmicos/exotérmicos observados en el perfil de flujo de calor de la figura 33. Este contenido de carbono identificado en la ceniza volante resulta de interés a la hora de la formulación de las pastas cerámicas, ya que su presencia puede llegar a disminuir el consumo energético para la fabricación del cerámico. Un evento endotérmico en 423 °C se observa en la figura 33; sin embargo, no se ha podido evidenciar alguna correlación con las fases presentes.

## 19. Inquemados de carbón

### 19.1 Caracterización estructural

Los resultados obtenidos se presentan en la figura 34 y en la tabla 25.

**Figura 34. Patrón de difracción de rayos X de los inquemados de carbón**

1) corindón; 2) cuarzo; 3) mullita

**Tabla 25. Composición estructural de los inquemados de carbón en horno colmena**

Fase		N.º Tarjeta PDF-2	Nombre	Cuantitativo (%)
Cristalino	SiO <sub>2</sub>	010-75-8321	Cuarzo	4,8
	Al <sub>4,52</sub> Si <sub>1,48</sub> O <sub>9,74</sub>	010-79-1457	Mullita	3,3
Total cristalino				8,1
Amorfos y otros				91,9

Los inquemados del carbón se caracterizan por ser mayoritariamente amorfos y de tipo orgánico acorde con los resultados de FRX y TG/DSC que se presentan más adelante.

## 19.2 Composición química

Los resultados de fluorescencia de rayos X son presentados en la tabla 26.

**Tabla 26. Composición química de los inquemados del carbón**

Elemento	Número atómico (Z)	Concentración (peso)	Óxido	Concentración (% peso)
Si	14	5,77	SiO <sub>2</sub>	12,34
Al	13	4,73	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,94
Fe	26	0,62	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,89
K	19	0,08	K <sub>2</sub> O	0,10



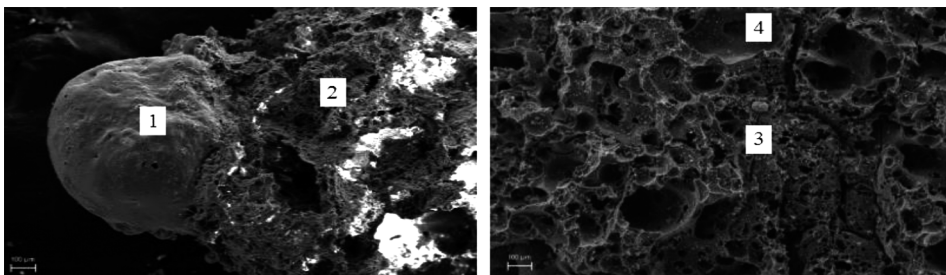
Elemento	Número atómico (Z)	Concentración (peso)	Óxido	Concentración (% peso)
Ca	20	0,24	CaO	0,33
Ti	22	0,12	TiO <sub>2</sub>	0,20
Mg	12	0,12	MgO	0,29
Na	11	0,06	Na <sub>2</sub> O	0,09
S	16	0,12	SO <sub>3</sub>	0,77
Ba	56	0,02	BaO	0,02
		---	LOI	76,01

De la tabla 26 se puede apreciar que solo 23,97% del peso de los inquemados de carbón corresponde a fase inorgánica. El valor restante está asociado a la materia orgánica presente en el material (ver análisis térmico). El silicio y el aluminio son los elementos más representativos de la fracción inorgánica, estando en concordancia con la tendencia del análisis de fases cristalinas establecidas por refinamiento Rietveld en la tabla 26. El contenido de azufre evidenciado puede llegar a aumentar las probabilidades de formación de eflorescencias en cerámicos donde se use este nutriente.

### 19.3 Caracterización microestructural

Las principales características morfológicas de los inquemados procedentes de hornos colmena son presentadas en la figura 35.

**Figura 35. Microfotografías (MEB) de los inquemados procedentes del horno colmena**



En las imágenes de los inquemados del carbón (figura 35) no se observan granos separados. Este hecho posiblemente esté asociado al tipo de elementos presentes en el material y al proceso de combustión usado en el horno colmena. Se puede apreciar que hay dos regiones, las cuales se diferencian por la mayor o menor presencia de porosidad. La región menos porosa parece tener un aspecto redondeado con posiblemente presencia de fase vítrea. La otra región es bastante

porosa, con diámetros de poro entre 20 y 200 micrómetros, posiblemente originados por la salida de gases del interior del carbón durante el proceso de combustión. Para este material se realizaron medidas de microanálisis químico en cuatro regiones, tal como se aprecia en la tabla 27.

**Tabla 27. Microquímica de algunas partículas presentes en los inquemados del carbón (% atómico)**

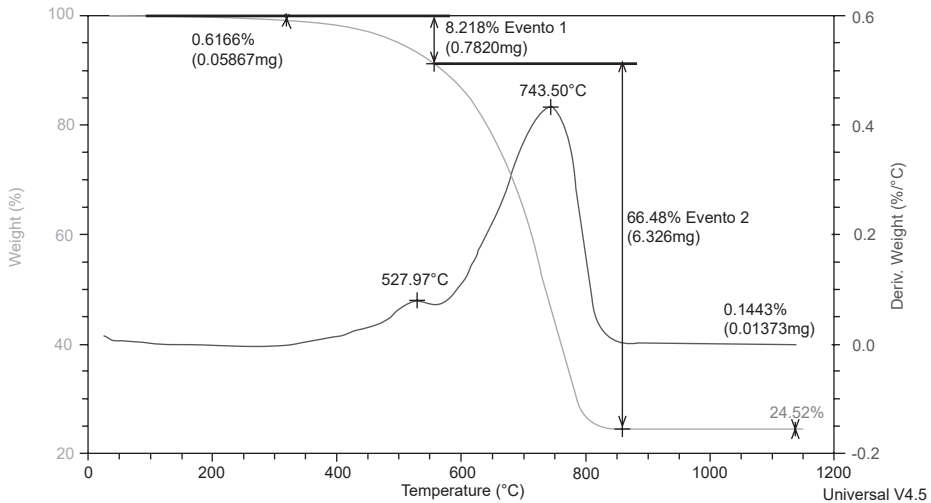
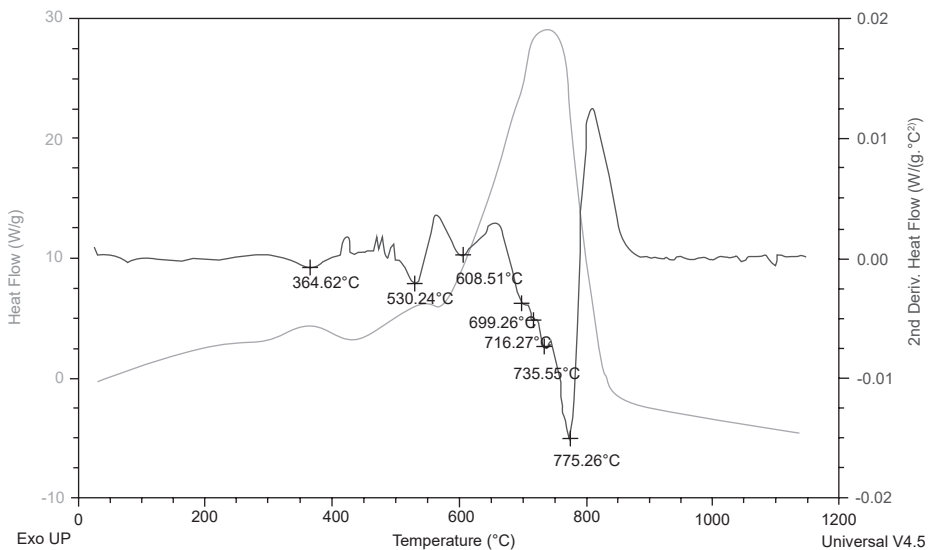
Elemento	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4
O	68,83	70,42	71,26	74,56
Na	0,37	0,22	---	---
Mg	0,42	0,19	---	---
Al	9,58	10,84	8,71	7,48
Si	16,14	16,12	12,54	8,93
S	---	---	1,70	2,83
K	0,85	0,98	0,41	---
Ca	0,17	0,12	1,26	1,83
Ti	0,33	0,66	0,49	---
Fe	3,30	0,44	3,64	4,36

Sobre la microquímica de este material se puede concluir:

- Es un material rico en oxígeno, silicio y aluminio.
- La región porosa se caracteriza por la presencia de azufre y por la escasa presencia de sodio y magnesio.
- La región menos porosa (sitio 1 y sitio 6) aparentemente presenta más concentración de hierro.

## 19.4 Caracterización termogravimétrica/calorimétrica

Las figuras 36 y 37 presentan los resultados del análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido.

**Figura 36. Perfiles TG y DTG de los inquemados del carbón (atmósfera de aire)****Figura 37. Perfil DSC de los inquemados del carbón (atmósfera de aire)**

Del perfil TG de la figura 36 se puede evidenciar que el material no presenta eventos de pérdida de masa asociados a agua físicamente absorbida/absorbida (<150 °C). Los eventos de pérdida de masa se evidencian arriba de los 500 °C y se caracterizan por ser de tipo exotérmico, acorde con los resultados del perfil de flujo de calor mostrado en la figura 37. Este resultado de pérdida de masa total (75 % aproximadamente) conlleva a sugerir que el material analizado es rico en fases orgánicas que no han logrado oxidarse durante el proceso de combustión en el horno colmena, dejando un material con bastante energía que puede ser de gran utilidad cuando se emplee en la formulación de pastas cerámicas.

## CAPÍTULO IV

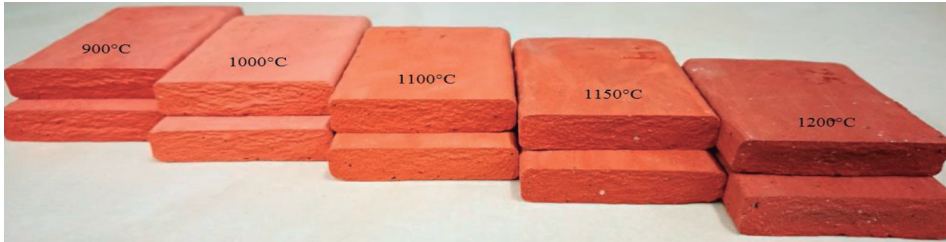
# **EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES TECNOLÓGICOS SOBRE LAS PRINCIPALES VARIABLES TECNOLÓGICAS DE UN MATERIAL CERÁMICO**

El desarrollo de esta sección se soporta en las formulaciones de las pastas cerámicas presentado en la Tabla 14. Inicialmente, se presenta el registro fotográfico de los cerámicos obtenidos con los diferentes nutrientes propuestos, concentración y temperatura de cocción. Esta información permite identificar algunos aspectos que son de interés a la hora de evaluar la calidad del cerámico de construcción obtenido. Aspectos como la tonalidad obtenida, la homogeneidad de la superficie del cerámico, la presencia de eflorescencias, el efecto de corazón negro y las fisuras son algunas de las variables que se pueden observar en las figuras 38 a 44.

Posteriormente, se presentan los resultados asociados al efecto de la concentración del nutriente en la pasta cerámica en función de la temperatura de cocción. Inicialmente se presenta el consolidado de cada variable analizada para todos los materiales cerámicos obtenidos (tablas 28 a 32). Luego se presenta para cada nutriente un análisis comparativo respecto a los resultados del material de referencia elaborado con solo arcilla (MA) (figura 38). Finalmente, se hace un comparativo de las propiedades de los cerámicos con mejor comportamiento frente a algunos criterios de clasificación y uso establecidos internacionalmente.

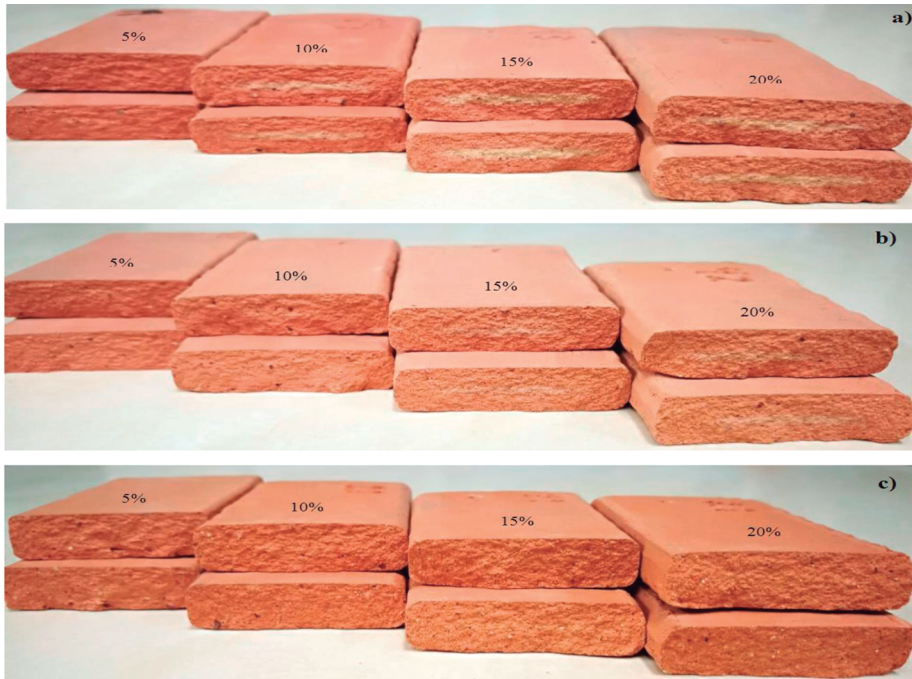
## 20. Aspectos macroscópicos

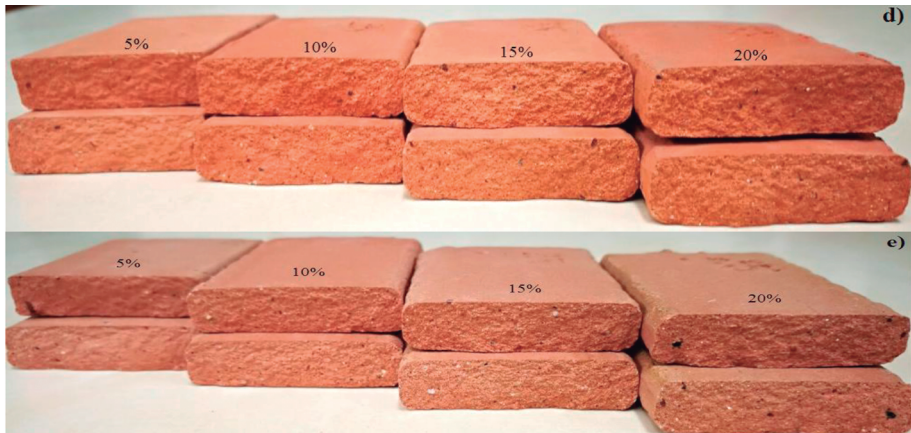
**Figura 38. Aspecto de los cerámicos elaborados con solo material arcilloso (MA)**



Del registro fotográfico de la figura 38 es posible conocer los principales aspectos de los cerámicos elaborados con solo material arcilloso. Se evidencia una tonalidad rojiza producto de la presencia de hierro en el material, tal como se observó en el apartado de caracterización. También se aprecian diferentes tonalidades a medida que se incrementa la temperatura de cocción, y superficialmente el material no presenta variabilidad de tonos.

**Figura 39. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso y ceniza volante como material sustituto**





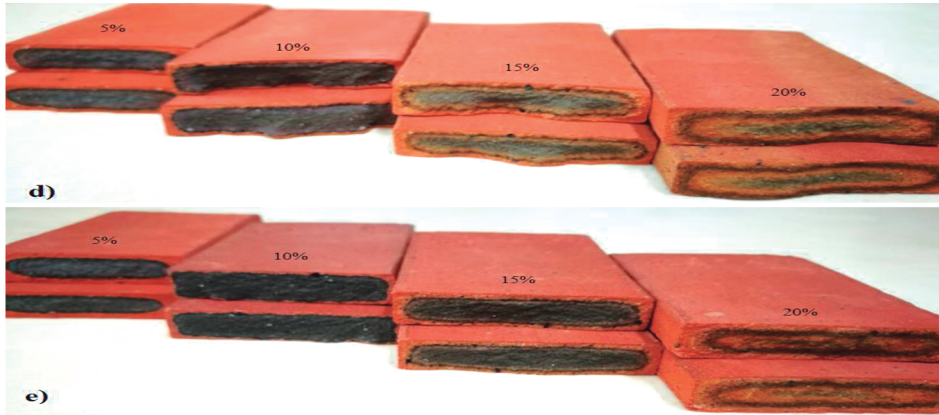
a) 900 °C; b) 1.000 °C; c) 1.100 °C; d) 1.150 °C; e) 1.200 °C

Los cerámicos elaborados con ceniza volante presentados en la figura 39 manifiestan ligeras variaciones en la tonalidad rojiza respecto al estándar. Superficialmente, muestran homogeneidad. Se evidencian algunos poros a simple vista y la posible presencia del efecto de corazón negro en bajas temperaturas, producto del carbón residual en el material identificado en la etapa de caracterización.

**Figura 40. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso e inquemados de carbón como material sustituto**



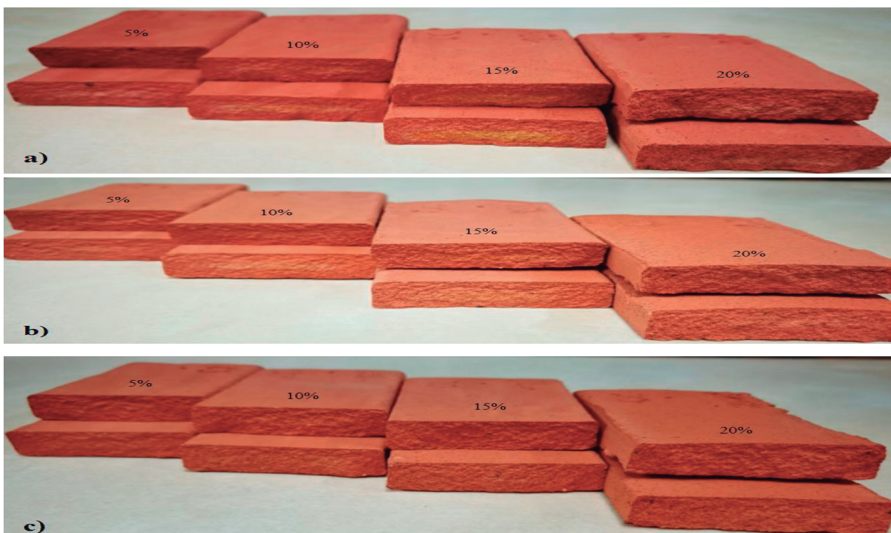


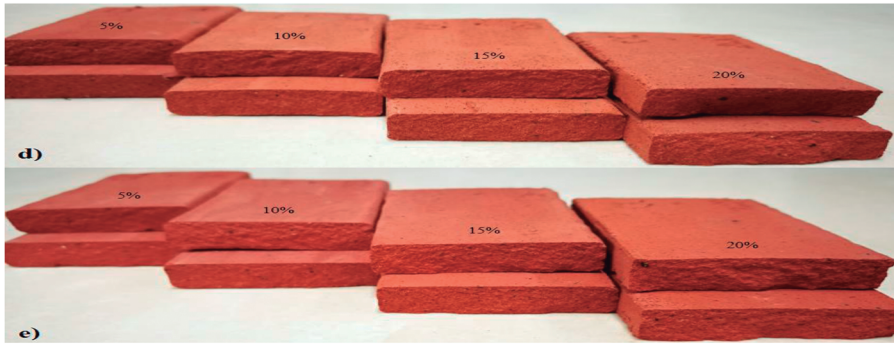


a) 900 °C; b) 1.000 °C; c) 1.100 °C; d) 1.150 °C; e) 1.200 °C

Los cerámicos elaborados con inquemados de carbón dejan ver homogeneidad a nivel superficial, sin cambios en la tonalidad rojiza aportada por el hierro. Sin embargo, sí se evidencia que en el interior del material el hierro presente ha sido reducido (tonalidad oscura ocasionada por un cambio de  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$  o incluso se podría pensar en  $\text{Fe}^0$ ), producto del alto contenido de carbono presente en este nutriente. Estos cambios de oxidación podrían llegar a afectar las propiedades tecnológicas del cerámico.

**Figura 41. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso y cisco de café como material sustituto**

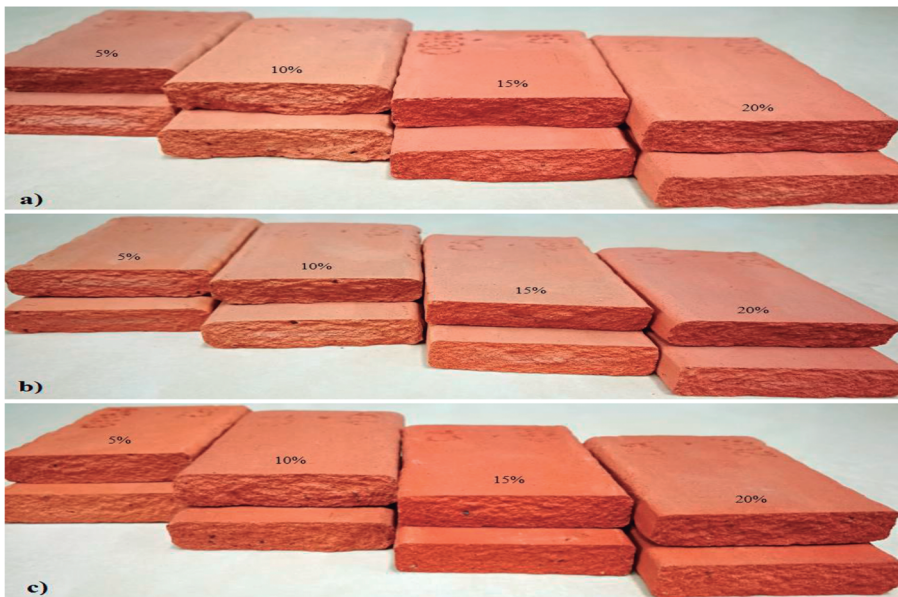




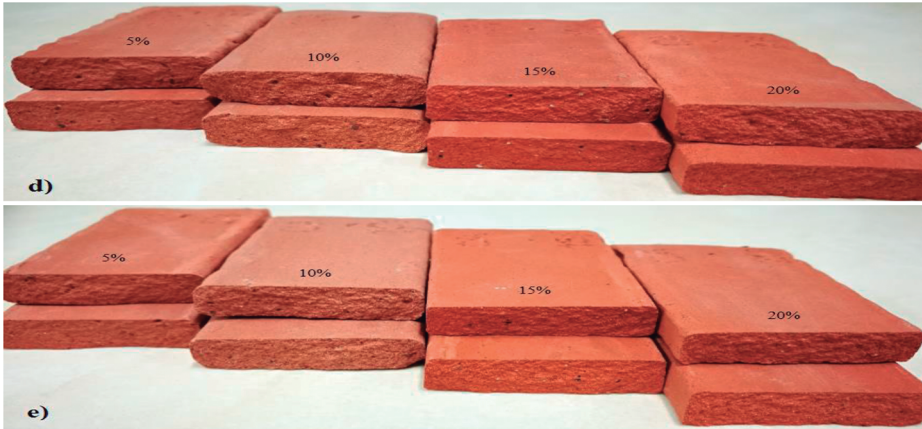
a) 900 °C; b) 1.000 °C; c) 1.100 °C; d) 1.150 °C; e) 1.200 °C

El registro fotográfico de la figura 41 muestra que los cerámicos obtenidos usando cisco de café como material sustituto presentan una tonalidad uniforme. En bajas concentraciones no se evidencian cambios notorios en el cerámico; sin embargo, en concentraciones arriba del 10% la porosidad ya es evidente a nivel superficial. En algunas muestras se observaron pequeños abultamientos producto de la acumulación de gas durante el proceso de cocción. En bajas temperaturas y concentraciones intermedias se evidenció la presencia de procesos reducción, posiblemente causados por el carbono presente en este nutriente, que consume parte del oxígeno presente naturalmente en el material arcilloso.

**Figura 42. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso y cascarilla de arroz pasante malla 16 como material sustituto**





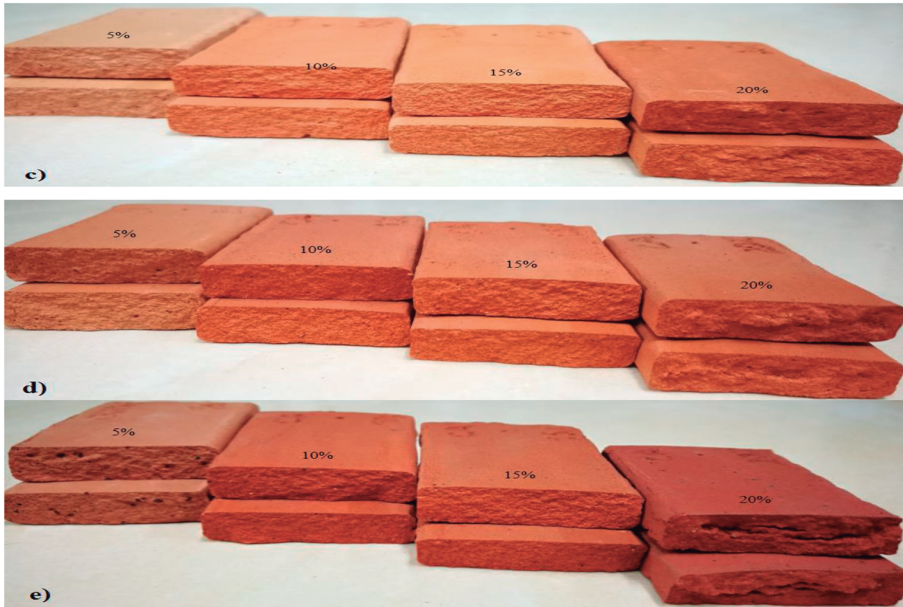


a) 900 °C; b) 1.000 °C; c) 1.100 °C; d) 1.150 °C; e) 1.200 °C

La figura 42 muestra el registro fotográfico de los cerámicos elaborados con cascarilla de arroz como material sustituto, en una granulometría menor o igual a la malla 16 Tyler. Se evidencia porosidad a simple vista en los materiales con más de 10% de cascarilla. A bajas temperaturas se observa variación en la tonalidad del cerámico, hecho que afecta la calidad estética del material y por tanto el uso que se le pueda dar en la industria de la construcción. A 900 y 1.000 °C se evidencia la formación del efecto de corazón negro debido a materia orgánica que aún no se ha oxidado totalmente.

**Figura 43. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso (MA) y cascarilla de arroz pasante malla 80 (CAb) como material sustituto**

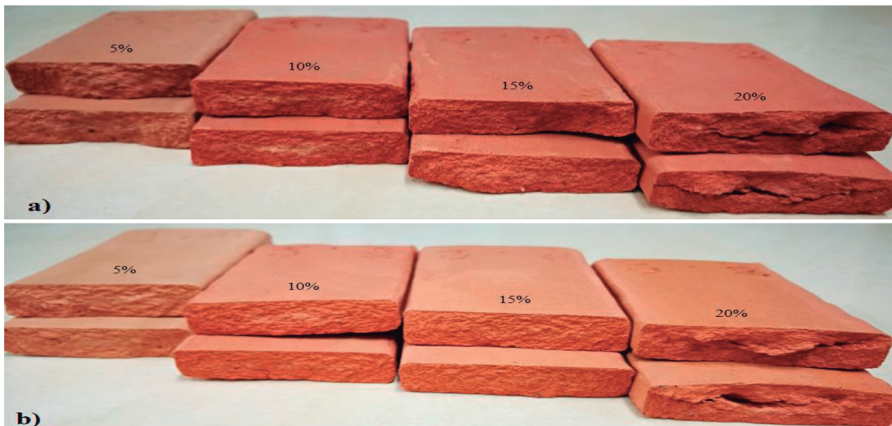




a) 900 °C; b) 1.000 °C; c) 1.100 °C; d) 1.150 °C; e) 1.200 °C

El registro fotográfico de la figura 45 deja ver un cerámico más homogéneo superficialmente. El uso de las cascarilla de arroz pasante malla 80 hace que la porosidad no sea tan notoria a simple vista, la tonalidad no se vea tan afectada y se ve mejor estéticamente. Se evidencia el efecto de corazón negro debajo de los 1000°C.

**Figura 44. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso (MA) y cascarilla de arroz pasante malla 200 (CAC) como material sustituto**





a) 900°C; b) 1000°C; c) 1100 °C; d) 1150 °C; e) 1200 °C

El registro fotográfico de la figura 44 deja ver cerámicos superficialmente uniformes. Es claro que el uso de la cascarilla de arroz en un tamaño de partícula más fino favorece tener una superficie más homogénea. Sin embargo, se evidenció que sustituciones superiores al 15% conllevan a la formación de hinchamientos en el interior del material. Este hecho podría asociarse a una mayor dificultad de salida de los gases de carbono formado por la combustión de la cascarilla, conllevando a posibles acumulaciones de gas en el centro de la probeta, como se observa en la figura 44 para el cerámico con el 20% de concentración. A bajas temperaturas se observa el efecto de corazón negro en el material.

## 21. Resultados de las propiedades tecnológicas evaluadas

**Tabla 28. Consolidado de los resultados de contracción de secado para los materiales conformados con los diferentes tipos y concentraciones de nutriente**

Código de la pasta cerámica	% contracción de secado
MA	8,21
CT5	5,71
CT10	4,67
CT15	5,78

<b>Código de la pasta cerámica</b>	<b>% contracción de secado</b>
CT20	5,48
IC 5	6,91
IC10	7,05
IC15	7,02
IC20	6,95
CC5	6,61
CC10	6,44
CC15	6,57
CC20	7,02
CAa5	4,84
CAa10	4,33
CAa15	3,75
CAa20	3,12
CAb5	5,39
CAb10	5,05
CAb15	5,89
CAb20	4,58
CAC5	5,36
CAC10	7,48
CAC15	7,31
CAC20	7,45

Varios aspectos importantes se pueden resaltar de la información de la tabla 28. Al hacer referencia a la ceniza volante como material sustituto en la pasta cerámica, se evidencia que este material tiene un efecto significativo para disminuir la contracción lineal de secado en cualquiera de las concentraciones usadas, siendo la sustitución con 10% la que permite obtener los mejores resultados (reducción de hasta 43%). En relación con el uso de residuo de la combustión del carbón en hornos colmena, también se evidencia una reducción de la contracción de secado; sin embargo, no se aprecia diferencia estadísticamente significativa entre todas las concentraciones de nutriente usado.

La reducción alcanzada es cercana al 16%. Para el cisco de café como material sustituto tampoco se evidencia una diferencia significativa en la contracción de secado para las diferentes concentraciones de nutriente. Aun así, parece que la pasta con 10% de sustitución es la que muestra el mejor comportamiento alcanzando una reducción de la contracción de 21%. Finalmente, para la cascarilla de arroz se evidencia que el tamaño de grano del nutriente y la concentración de este tienen influencia sobre la contracción. Es claro que un tamaño más grueso y

una mayor sustitución contribuyen a disminuir la contracción de secado hasta un 62%. El orden de mejora es entonces CAa20> CT10>CC10>IC5.

**Tabla 29. Consolidado de los resultados de contracción lineal de cocción**

Código cerámico	% Contracción de cocción				
	900 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.150 °C	1.200 °C
MA	0,08	0,72	3,07	3,73	3,71
CT5	0,58	0,26	1,85	2,20	3,05
CT10	0,26	0,34	2,20	2,49	3,21
CT15	0,39	0,27	2,15	2,86	3,15
CT20	0,37	0,44	2,46	2,96	3,41
IC 5	0,27	0,20	2,25	2,50	2,42
IC10	0,10	0,71	2,13	2,15	2,20
IC15	0,18	0,80	2,19	2,14	2,23
IC20	0,25	0,76	2,11	2,18	2,21
CC5	0,25	0,97	2,98	4,14	4,69
CC10	0,21	0,94	3,19	4,60	5,34
CC15	0,38	1,13	3,85	5,20	5,86
CC20	0,44	0,92	3,84	5,50	5,87
CAa5	0,32	0,65	2,14	2,55	2,74
CAa10	0,62	1,63	4,51	4,34	4,69
CAa15	0,30	1,57	4,43	4,92	4,76
CAa20	0,50	1,93	4,90	5,58	5,64
CAb5	0,42	0,30	3,64	4,18	4,20
CAb10	0,52	0,12	3,26	3,98	3,97
CAb15	0,72	0,38	4,76	5,18	5,08
CAb20	0,55	0,55	5,04	5,43	5,31
CAc5	0,35	0,18	1,08	1,78	2,47
CAc10	0,22	0,21	1,96	3,07	3,46
CAc15	0,18	0,42	2,05	3,46	4,18
CAc20	0,23	0,58	2,82	4,41	5,46

Varios aspectos importantes se pueden resaltar de la información de la tabla 29. Al hacer referencia a la ceniza volante como material sustituto en la pasta cerámica, se evidencia que este material tiene un efecto significativo para disminuir la contracción lineal de cocción en prácticamente todas las temperaturas de cocción (excepto 900 °C) y concentraciones evaluadas. Con 5 y 10% de sustitución se logran



las reducciones más significativas (17,8% a 1.200 °C). Se observa una relación inversamente proporcional entre la contracción de cocción y la concentración de ceniza volante en el cerámico. Al usar inquemados del horno colmena se presenta algo similar al resultado de contracción de secado, es decir, no hay una diferencia significativa que permita proponer a una de las mezclas como mejor que la otra; lo que sí es claro es que logra reducir la contracción de cocción hasta en un 40,7% en 1.200 °C.

En cuanto al uso de cisco de café, se evidencia que este material, en cualquiera de las concentraciones usadas, no contribuye a reducir la contracción de cocción. Se observa una relación directa entre la cantidad de nutriente usado y la contracción de cocción. Este hecho podría estar asociado al alto contenido de pérdidas de calcinación de este nutriente acorde con los resultados de caracterización.

Para la cascarilla de arroz, la información de la tabla 30 deja ver que el tamaño de grano y la concentración del nutriente tienen influencia sobre la contracción de cocción. A mayor concentración del nutriente, mayor contracción de cocción, similar al efecto evidenciado cuando se usa cisco de café. La cascarilla en su forma más fina y en baja concentración es la que ofrece los menores cambios en cuanto a la contracción lineal del cerámico (hasta 34% de reducción en 1.200 °C). El orden de mejora es entonces IC10>CAc5> CT5>CC5.

**Tabla 30. Consolidado de la prueba de porcentaje de absorción de agua**

Código cerámico	% absorción de agua				
	900 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.150 °C	1.200 °C
MA	11,96	11,15	6,83	4,17	1,86
CT5	11,03	11,19	7,55	6,16	5,89
CT10	13,99	12,43	9,81	8,24	7,90
CT15	13,41	13,38	10,99	9,53	9,26
CT20	15,17	15,08	12,6	11,13	10,76
IC 5	12,57	12,08	8,26	7,1	5,19
IC10	14,03	13,11	9,98	8,59	8,32
IC15	16,39	16,7	14,99	14,05	13,34
IC20	22,23	23,34	21,55	19,22	17,93
CC5	14,87	14,21	11,67	8,01	7,54
CC10	18,30	17,99	15,36	11,27	11,77
CC15	29,00	28,01	22,67	18,94	19,30
CC20	42,94	41,34	32,29	28,20	28,14
CAa5	18,72	18,66	16,29	14,97	14,06

Código cerámico	% absorción de agua				
	900 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.150 °C	1.200 °C
<b>CAa10</b>	25,45	23,72	17,12	15,71	14,90
<b>CAa15</b>	33,76	32,85	25,20	23,55	22,81
<b>CAa20</b>	41,81	39,65	31,15	28,75	27,70
<b>CAb5</b>	14,79	14,00	9,69	8,72	9,48
<b>CAb10</b>	24,42	23,99	19,21	16,96	16,64
<b>CAb15</b>	29,10	28,55	20,63	19,00	18,85
<b>CAb20</b>	39,74	40,51	29,12	26,84	26,73
<b>CAc5</b>	18,06	18,78	19,79	16,63	14,50
<b>CAc10</b>	21,29	21,85	19,60	16,69	14,10
<b>CAc15</b>	28,48	28,43	25,92	23,40	19,96
<b>CAc20</b>	41,71	40,47	35,20	30,71	24,27

De la información de la tabla 30 se evidencian los siguientes aspectos: en términos generales se aprecia que un aumento de la concentración de todos los nutrientes conlleva a un aumento del porcentaje de absorción de agua, es decir, mayor porosidad en el material; por tanto, se podría pensar que si lo que se busca es obtener un material con poca absorción de agua, solo se debería usar el 5% de nutriente. En este caso el mejor resultado fue obtenido usando los inquemados de carbón y la ceniza volante. Con este último material (5%) no se observan diferencias significativas con respecto al patrón hasta los 1.100 °C. Para los nutrientes de tipo orgánico (cascarilla y cisco) es lógico el mayor grado de porosidad debido al alto nivel de pérdidas por calcinación identificado en la etapa de caracterización; sin embargo, es importante resaltar que, a pesar de que el cisco tiene mayores pérdidas de calcinación (98,2%) respecto a la cascarilla (83,5%), los cerámicos con cisco presentaron menor porcentaje de absorción hasta en concentraciones del 15% respecto a los cerámicos elaborados con cascarilla.

**Tabla 31. Consolidado de los resultados de resistencia mecánica a la flexión**

Código cerámico	Resistencia a la flexión (N/mm <sup>2</sup> )				
	900 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.150 °C	1.200 °C
<b>MA</b>	12,01	16,93	24,09	30,09	25,97
<b>CT5</b>	11,78	10,58	20,43	20,19	20,89
<b>CT10</b>	9,68	10,89	17,05	18,03	18,73
<b>CT15</b>	8,61	9,50	15,78	16,18	17,77
<b>CT20</b>	6,89	8,17	14,20	15,28	16,25
<b>IC 5</b>	18,15	7,96	12,9	15,28	24,01

Código cerámico	Resistencia a la flexión (N/mm <sup>2</sup> )				
	900 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.150 °C	1.200 °C
<b>IC10</b>	15,96	21,41	14,34	11,33	12,43
<b>IC15</b>	16,12	19,57	10,57	13,11	16,8
<b>IC20</b>	12,72	16,02	13,19	6,43	16,91
<b>CC5</b>	8,67	13,35	18,59	25,86	23,90
<b>CC10</b>	8,43	11,91	16,98	25,46	22,74
<b>CC15</b>	6,94	10,50	15,09	22,75	21,09
<b>CC20</b>	4,56	6,19	10,63	17,13	15,24
<b>CAa5</b>	6,32	7,78	11,74	12,5	13,84
<b>CAa10</b>	8,77	11,29	18,08	19,13	18,93
<b>CAa15</b>	5,54	6,95	10,60	12,00	12,63
<b>CAa20</b>	4,22	5,67	9,71	10,74	11,82
<b>CAb5</b>	8,51	9,77	18,26	20,24	18,76
<b>CAb10</b>	5,50	6,32	11,00	12,42	12,48
<b>CAb15</b>	7,08	7,33	14,32	15,46	14,97
<b>CAb20</b>	5,69	5,57	11,76	13,36	12,76
<b>CAc5</b>	4,78	6,55	7,88	10,16	12,00
<b>CAc10</b>	5,63	8,14	10,93	13,18	16,40
<b>CAc15</b>	4,20	6,45	8,48	11,16	13,21
<b>CAc20</b>	3,50	4,93	7,85	10,25	12,42

Una de las propiedades tecnológicas más importantes de un material cerámico de construcción es su resistencia mecánica a la flexión, especialmente en el caso de productos para pisos, revestimientos y cubiertas para techo. La información de la tabla 31 muestra el consolidado de esta prueba para todos los cerámicos elaborados. El primer aspecto por destacar es la existencia de un punto de inflexión en estos materiales, donde se alcanza la mayor resistencia. Este punto parece estar entre 1.150 y 1.200°C. En relación con el efecto de los nutrientes usados sobre esta propiedad tecnológica, varios aspectos pueden ser destacados. Lo primero es que ninguno de los materiales usados como sustituto logró igualar o superar los valores de resistencia mecánica a la flexión del estándar en temperaturas superiores a los 1.100 °C; los cerámicos elaborados con el cisco de café en concentraciones del 5 y 10% fueron los que mostraron los valores de resistencia más elevados.

Por otro lado, es importante resaltar el efecto ocasionado por los inquemados del carbón para mejorar la resistencia mecánica del cerámico en 900 y 1.000 °C. El uso de 10% de este nutriente permite obtener un valor de resistencia mecánica a



la flexión superior a la del propio estándar elaborado con solo material arcilloso. La explicación a este comportamiento no es muy clara, aunque se podría pensar que la presencia de residuos de carbón y el efecto reductor ocasionado (ver Figura 40) tienen alguna influencia en este resultado.

Sobre el papel de los otros dos nutrientes se observa, para la ceniza volante, que los mejores resultados se logran con el 5 y 10% de sustitución, evidenciando poco crecimiento en el módulo de rotura en temperaturas superiores a los 1.100 °C. Para el caso de la cascarilla de arroz, se aprecia que fue el nutriente con menos potencial. Un aspecto importante por resaltar es el hecho de que el tamaño de grano sí logra generar cambios en esta variable. A su vez, se ha resaltado en la tabla 31 que la presencia de solo 5% de cascarilla pasante malla 80 Tyler logra un efecto similar al del material con 10% de cascarilla pero pasante malla 16 Tyler.

**Tabla 32. Consolidado de pruebas de resistencia a la abrasión profunda**

Código cerámico	Resistencia a la abrasión profunda (volumen removido (mm <sup>3</sup> ))				
	900 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.150 °C	1.200 °C
MA	109	116	104	95	89
CT5	116	95	77	95	139
CT10	95	95	83	95	109
CT15	89	83	83	89	83
CT20	83	95	72	77	89
IC 5	67	109	89	116	95
IC10	83	95	83	116	123
IC15	95	83	72	95	89
IC20	95	83	116	131	83
CC5	89	72	77	123	95
CC10	95	95	95	109	102
CC15	89	83	95	139	123
CC20	67	77	116	116	116
CAa5	131	116	102	65	109
CAa10	102	116	123	139	123
CAa15	131	131	147	109	116
CAa20	131	147	147	131	116
CAb5	95	156	139	131	165
CAb10	139	123	72	83	131
CAb15	116	116	83	83	95
CAb20	131	116	83	116	77
CAC5	123	67	85	89	109
CAC10	102	67	83	123	72
CAC15	89	83	116	77	72
CAC20	77	72	83	67	77

Sobre la información de la tabla 32, varios aspectos se pueden resaltar. El primero de ellos es que solamente el cerámico elaborado con solo arcilla mostró un comportamiento descendente en la cantidad de volumen removido. El uso de cada nutriente parece tener un efecto particular sobre el resultado de resistencia mecánica a la abrasión profunda. Para el caso de la ceniza volante, se evidencia que el volumen de material removido tiende a reducir hasta los 1.100 °C, y de ahí en adelante se observa un retroceso en esta variable, posiblemente por cambios estructurales en el material (este aspecto será discutido en el siguiente apartado).

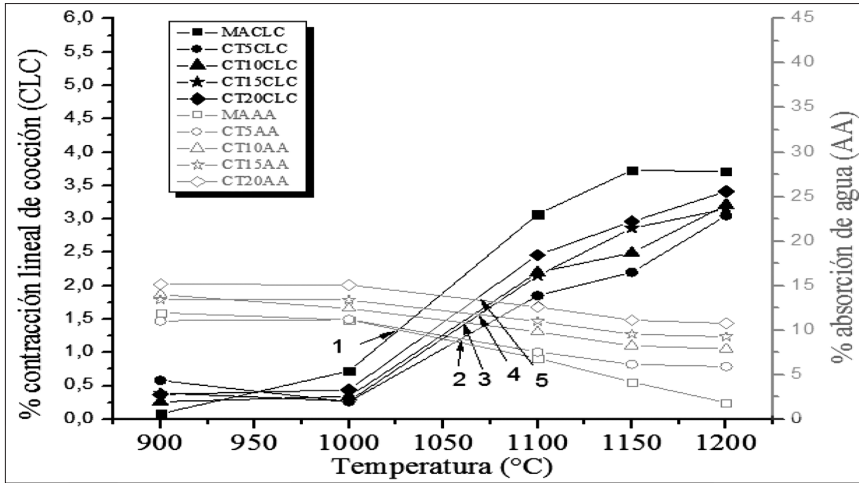
En términos generales, se puede establecer que hay una relación inversa entre el volumen removido (resistencia) y la concentración de ceniza volante. La alta concentración de fase amorfa, el pequeño tamaño de grano de este material e incluso la misma morfología de la ceniza podrían estar afectando este resultado.

En cuanto a los inquemados de carbón del horno colmena, los resultados no muestran una tendencia clara. Aparentemente, se observa que hay una mayor resistencia mecánica a bajas temperaturas de cocción. Este hecho nuevamente podría estar asociado al carbono residual y los efectos del proceso de reducción sobre la pasta cerámica.

En el caso del cisco de café también se observa un comportamiento diferente de la tendencia obtenida con solo materiales arcillosos (reducción de la cantidad del volumen removido con el incremento de la temperatura). En este caso, a bajas temperaturas es donde se evidencian los menores volúmenes de remoción de material; arriba de 1.100 °C el material pierde resistencia a la abrasión profunda y no hay una tendencia clara sobre la concentración de cisco en esta propiedad tecnológica. Finalmente, en el caso de la cascarilla de arroz tampoco se evidencia una tendencia clara en cuanto a la concentración y tamaño de grano del material. Aun así, se observa que los volúmenes más bajos de remoción se dan en torno a los 1.100 °C, siendo el cerámico CAC al 20% el de menor variabilidad en cuanto al volumen de remoción.

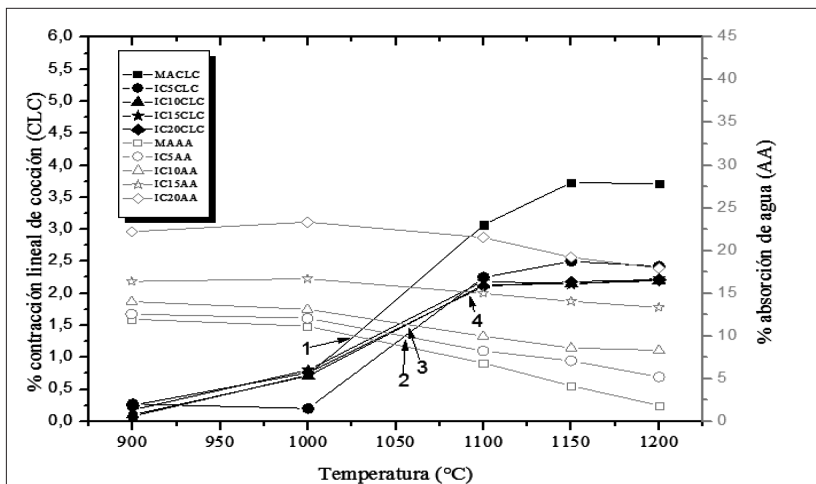
A continuación, en las figuras 45 a 50 se presentan las curvas de gresificación para todas las pastas utilizadas. Se presenta una figura para cada nutriente comparada con el patrón de solo arcilla.

**Figura 45. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con ceniza volante (CT) como material sustituto**



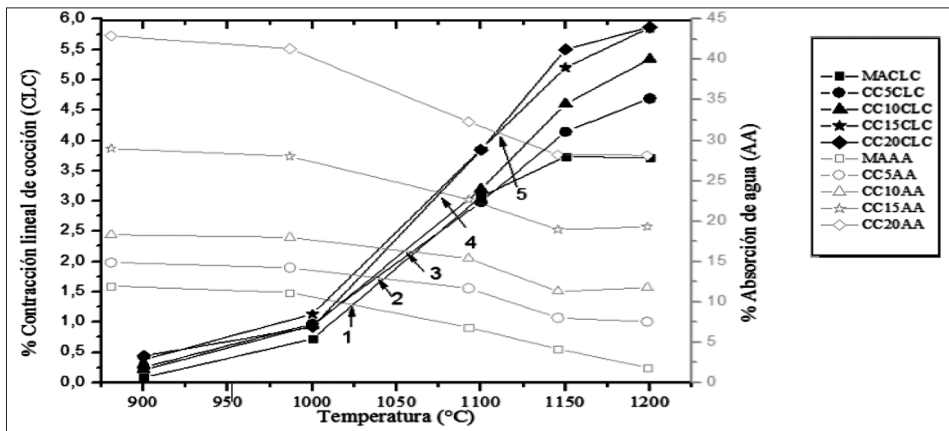
Al graficar los datos de contracción de cocción y porcentaje de absorción de los diferentes pastas (figura 45), se evidencia que el material patrón (MA) es el que presenta la menor temperatura (1.026 °C). El orden de gresificación es el siguiente: MA (1.026 °C) > CT5 (1.059 °C) > CT10 (1.063 °C) > CT15 (1.069 °C) > CT20 (1.071 °C). Acorde con este resultado, se puede inferir que una mayor concentración de ceniza volante aumenta el punto de vitrificación, aunque las diferencias no son significativas.

**Figura 46. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con inquemados de carbón de horno colmena (IC) como material sustituto**



Un caso similar se da al usar inquemados de carbón del horno colmena. En este caso se observa también que el punto de gresificación incrementa con el contenido de nutriente adicionado a la pasta. El orden obtenido es el siguiente: MA (1.026 °C) > IC5 (1.055 °C) > IC10 (1.057 °C) > IC15 (1.092 °C) > CT20 (no se evidenció punto de corte). No se advierten diferencias significativas entre el uso de la ceniza volante y los inquemados del horno colmena. En bajas concentraciones de nutriente, una aparente mejora es obtenida usando IC, y en altas concentraciones un mejor resultado es obtenido con CT. Este hecho podría estar asociado a la mayor cantidad de carbono residual en el nutriente IC.

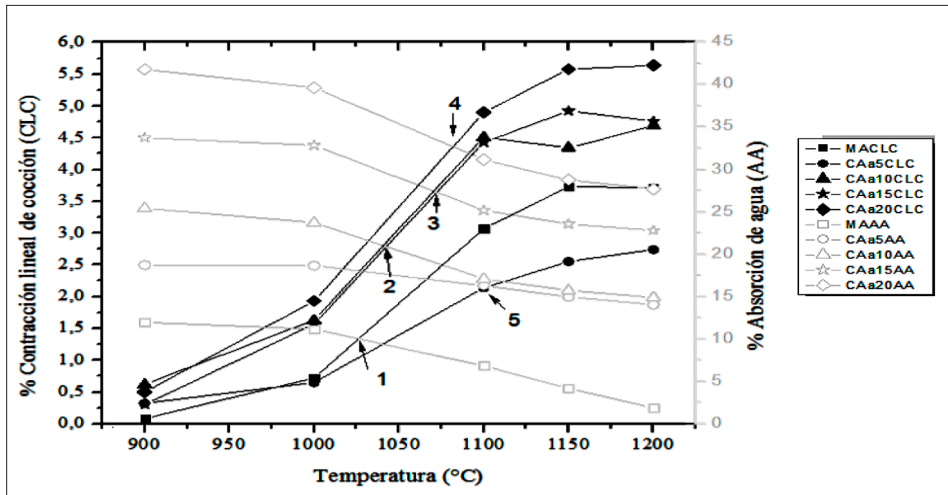
**Figura 47. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cisco de café (CC) como material sustituto**



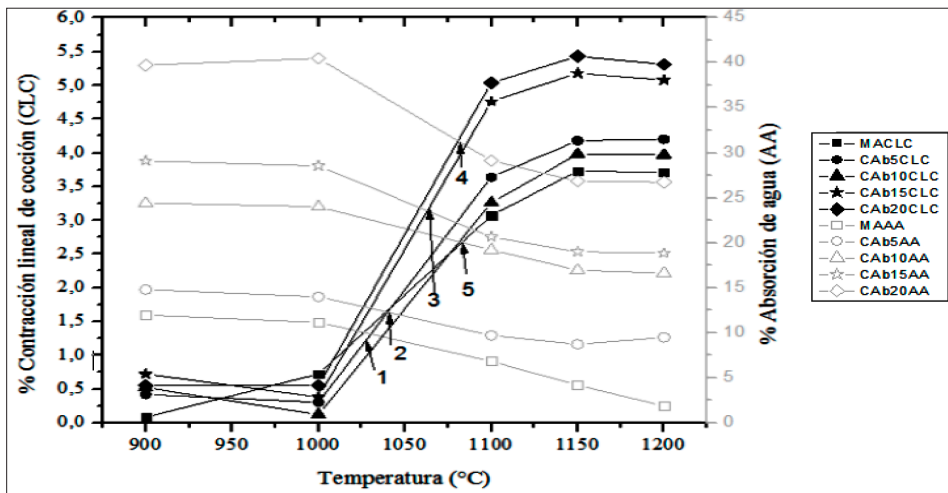
Con el cisco de café sucede algo similar a lo observado con los inquemados del horno colmena. El alto contenido de pérdidas de calcinación producto de la oxidación de la materia orgánica podría ser responsable de este hecho. El incremento del punto de vitrificación está en función de la cantidad de cisco

adicionado. El orden de crecimiento es el siguiente: MA (1.026 °C) > CC5 (1.049 °C) > CC10 (1.065 °C) > CC15 (1.084 °C) > CC20 (1.116 °C).

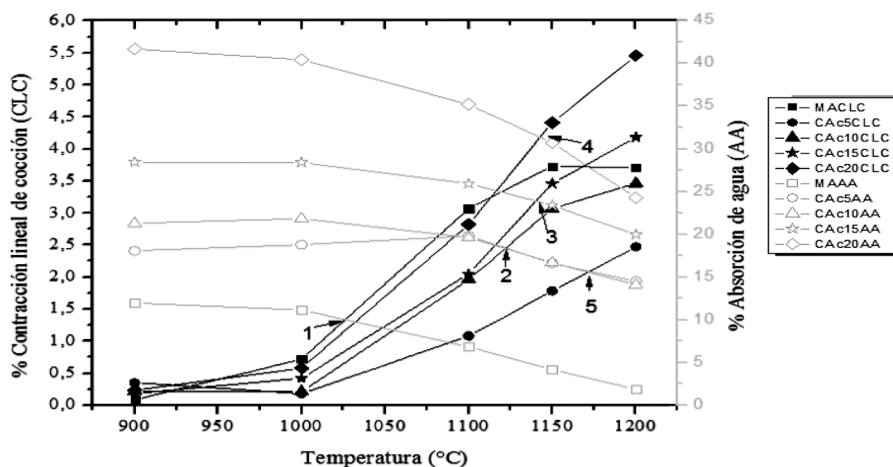
**Figura 48. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cascarilla de arroz pasante malla 16 (CAa) como material sustituto**



**Figura 49. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cascarilla de arroz pasante malla 80 (CAb) como material sustituto**



**Figura 50. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cascarilla de arroz pasante malla 200 (CAc) como material sustituto**



Respecto al uso de cascarilla de arroz, los resultados presentados en las figuras 48, 49 y 50 dejan ver que efectivamente el tamaño de grano del nutriente tiene influencia sobre el punto de gresificación. Diferencias significativas son evidenciadas cuando la cascarilla de arroz se encuentra en el menor tamaño de grano (pasante malla 200). En este caso particular, todas las pastas presentan un punto de gresificación por arriba de 1.100 °C, superior a las pastas con cascarilla de arroz pasante malla 16 y malla 80. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

MA (1.026 °C) > CAa10 (1.042 °C) > CAa15 (1.072 °C) > CAa20 (1.083 °C) > CAa5 (1.102 °C).

MA (1.026 °C) > CAB5 (1.041 °C) > CAB15 (1.064 °C) > Cab20 (1.081 °C) > Cab10 (1.083 °C).

MA (1.026 °C) > CAc10 (1.122 °C) > CAc15 (1.141 °C) > CAc20 (1.144 °C) > CAc5 (1.172 °C).

No es posible establecer una tendencia en función del contenido de cascarilla de arroz pues los datos son contradictorios. Este aspecto es especialmente notorio con 5 y 10% de concentración de nutriente en la pasta. En términos generales, el mejor comportamiento en cuanto a la curva de gresificación se obtiene usando el tamaño de grano intermedio (pasante malla 80) y un 5% respecto a la concentración de la cascarilla. Aunque el punto de vitrificación es muy similar al obtenido con CAa10, los datos de las propiedades tecnológicas ligeramente favorecen a la pasta CAB5.

## 22. Posibilidades de aplicación de los materiales cerámicos obtenidos

Para esta parte del proceso se tomarán como referencia las siguientes pastas, las cuales fueron las que mostraron el mejor comportamiento en las propiedades físico-cerámicas evaluadas:

- MA: Como material de referencia, es importante aclarar que ninguna de las pastas con presencia de nutriente igualó o superó los valores de las propiedades tecnológicas de los cerámicos obtenidos con este material.
- CT10: Los valores de las propiedades tecnológicas son muy similares con CT5. Sin embargo, se toma como punto a favor la mayor cantidad de nutriente que puede adicionarse a la pasta y, por ende, la mayor cantidad de carbono residual que puede aportar calor exotérmico al sistema.
- IC5: Presenta un comportamiento más predecible respecto a IC10, que es la pasta con valores favorables más cercano.
- CC5: En esta concentración se obtienen los mejores valores en las propiedades tecnológicas del cerámico elaborado con cisco de café.
- CAb5: Junto con CAa10, muestra los mejores valores de las propiedades tecnológicas de los cerámicos elaborados con cascarilla de arroz. Se ha seleccionado Cab5 ya que permite obtener un mejor aspecto estético del cerámico.

El consolidado de sus propiedades tecnológicas se presenta en la tabla 33. Estos resultados se comparan con algunos referentes internacionales presentados en la tabla 34.

**Tabla 33. Valores de las propiedades tecnológicas de los cerámicos obtenidos con las pastas de mejor comportamiento**

Pasta	Temperatura (°C)	Contracción de secado (%)	Contracción de cocción (%)	Absorción de agua (%)	Resistencia a la flexión (fuerza de rotura (N))	Resistencia a la abrasión profunda (mm <sup>3</sup> )
MA	900	8,21	0,08	11,96	669	109
	1.000		0,72	11,15	927	116
	1.100		3,07	6,83	1265	104
	1.150		3,73	4,17	1539	95
	1.200		3,71	1,86	1338	89
CT10	900	4,67	0,26	13,99	599	95
	1.000		0,34	12,43	670	95
	1.100		2,20	9,81	1017	83
	1.150		2,49	8,24	1055	95
	1.200		3,21	7,90	1080	109

Pasta	Temperatura (°C)	Contracción de secado (%)	Contracción de cocción (%)	Absorción de agua (%)	Resistencia a la flexión (fuerza de rotura (N))	Resistencia a la abrasión profunda (mm <sup>3</sup> )
IC5	900	6,91	0,27	12,57	869	67
	1.000		0,20	12,08	448	109
	1.100		2,25	8,26	680	89
	1.150		2,50	7,10	806	116
	1.200		2,42	5,19	1250	95
CC5	900	6,61	0,25	14,87	463	89
	1.000		0,97	14,21	711	72
	1.100		2,98	11,67	933	77
	1.150		4,14	8,01	1083	123
	1.200		4,69	7,54	1179	95
CAb5	900	5,39	0,42	14,79	495	95
	1.000		0,30	14,00	564	156
	1.100		3,64	9,69	987	139
	1.150		4,18	8,72	1080	131
	1.200		4,20	9,48	998	165

Tabla 34. Requisitos de baldosas cerámicas

Uso	Carga de rotura mínima (N)	Abrasión profunda máxima (mm <sup>3</sup> )
Revestimiento interior/externo	450	---
Suelos interiores de locales residenciales	900	2.365
Suelos exteriores de locales residenciales	900	2.365
Suelo de locales comerciales o colectivos	900	649
Suelos de locales industriales	2.000	393

Fuente: (Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos, s.f.; Enrique, s.f.; Colegio Territorial de Arquitectos de Castellón, s.f.).

Al comparar los requisitos mínimos de resistencia mecánica a la flexión presentados en la tabla 33 con los datos obtenidos para los cerámicos elaborados con los nutrientes tecnológicos propuestos, se evidencia que todos superan la barrera mínima para su uso como revestimientos en exteriores e interiores, incluso en la temperatura más baja de cocción. La aplicación en exteriores debería ponerse a consideración debido al alto porcentaje absorción de algunos de los materiales.



El material de referencia puede alcanzar a 1.000 °C el valor mínimo de carga de rotura que se requiere para que el cerámico pueda ser usado en suelos interiores residenciales, suelos exteriores residenciales y suelos locativos comerciales. Sin embargo, para los cerámicos elaborados con nutrientes esta barrera solo se supera a temperaturas superiores; en 1.100 °C solo el cerámico elaborado con inquemados de carbón de horno colmena no ha alcanzado este requisito mínimo. Al igual que con las baldosas para revestimiento, se debe poner en consideración su uso en exteriores debido a que los valores de absorción de agua aún son altos para algunos de los materiales.

Ninguno de los materiales cumple el requisito mínimo para poder ser usado como pavimento de locales industriales.

Los valores de resistencia a la abrasión profunda obtenidos para los cerámicos producidos resultan bastantes satisfactorios y cumplen a cabalidad los requisitos propuestos en la tabla 34.

### **23. Selección de la pasta con mejor comportamiento en el proceso cerámico**

En la tabla 33 se evidencia que los cerámicos elaborados con las pastas CT10 y CC5 son los que presentan un mejor comportamiento. En particular, se considera para los análisis posteriores seguir trabajando con la pasta CT10 debido a que esta presentó los menores valores de contracción de secado y porque con este nutriente no es necesario realizar la operación de molienda para ajustar el tamaño de grano en la pasta.

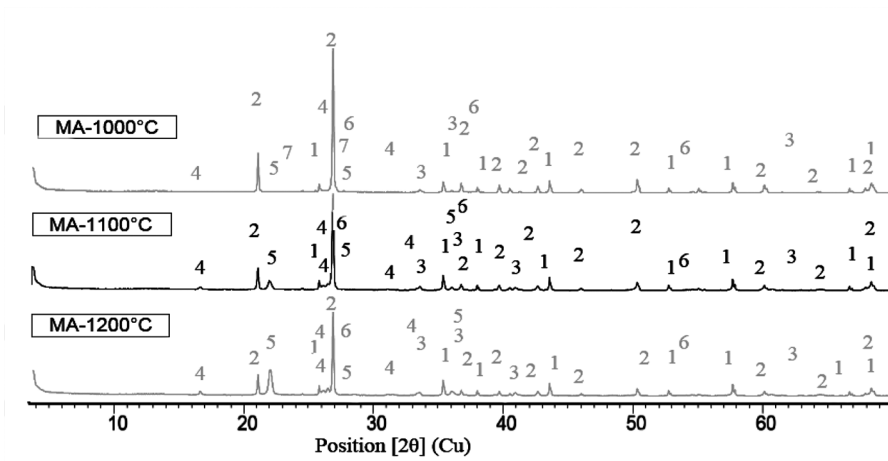
## CAPÍTULO V

# **EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL NUTRIENTE TECNOLÓGICO SOBRE LA MICROESTRUCTURA DEL MATERIAL CERÁMICO SELECCIONADO (CT10)**

Una vez seleccionada la pasta cerámica con presencia de 10% de ceniza volante como el material que permite obtener un buen comportamiento en las propiedades tecnológicas del cerámico respecto a la pasta patrón (MA100), se procedió a establecer qué sucede a nivel de microestructura en los materiales obtenidos a medida que se incrementa la temperatura. Este análisis ha sido propuesto a fin de llegar explicar parte del comportamiento obtenido por los materiales en las pruebas físico-cerámicas presentadas en el apartado de anterior.

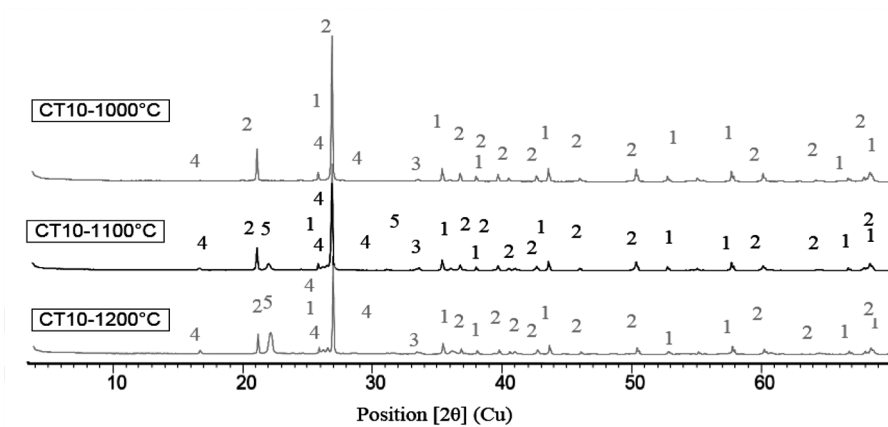
Los cambios a nivel microestructural fueron seguidos mediante el uso de la técnica de difracción de rayos X. Los resultados son presentados en las figuras 51 y 52. La cuantificación mediante refinamiento Rietveld es presentada en la tabla 35.

**Figura 51. Patrón de difracción de rayos X del material arcilloso**



1) corundum; 2) quartz; 3) hematite; 4) mullite; 5) cristobalite; 6) rutile; 7) microcline

**Figura 52. Patrón de difracción de rayos X con la adición del 10% de cenizas volantes**



1) corundum; 2) quartz; 3) hematite; 4) mullite; 5) cristobalite; 6) rutile; 7) microcline

**Tabla 35. Composición microestructural de los materiales cerámicos MA100 y CT10 a diferentes temperaturas (%peso)**

Fase	MA100			CT10		
	1.000 °C	1.100 °C	1.200 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.200 °C
Cuarzo	60,2	42,3	34,6	50,1	57,7	42,9
Hematita	3,4	2,7	2,9	2,4	3,4	1,7

Fase	MA100			CT10		
	1.000 °C	1.100 °C	1.200 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.200 °C
Rutilo	1,0	0,8	0,8	0,6	0,5	0,5
Microclina	1,0	0,0	0,0	1,5	0,4	
Mullita	2,5	22,6	25,4	3,2	22,9	24,8
Cristobalita baja (760938)	0,5	7,1	4,5	0,0	8,5	4,5
Cristobalita baja (760941)	0,0	0,7	18,4	0,0	0,0	22,8
Moscovita	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0
<b>Cristalinos</b>	<b>68,6</b>	<b>76,2</b>	<b>86,6</b>	<b>59,6</b>	<b>93,4</b>	<b>97,2</b>
<b>Amorfos</b>	<b>31,4</b>	<b>23,8</b>	<b>13,4</b>	<b>40,4</b>	<b>6,6</b>	<b>2,8</b>

De la información presentada en las figuras 51 y 52 y en la tabla 35 se puede evidenciar que existen algunos aspectos que conllevan a sugerir que hay diferencias en el mecanismo de reacción a altas temperaturas entre ambos tipos de pastas cerámicas (MA y CT10). El aspecto más diferenciador entre ambos cerámicos obtenidos se da por la velocidad de transformación de la fase amorfa acorde con las tres temperaturas de evaluación.

Se evidencia en la tabla 35 cómo para el cerámico elaborado con solo material arcilloso (MA) existe una velocidad más lenta de transformación de la fase amorfa en comparación con el material con presencia de ceniza volante. A los 1.000 °C es notoria una mayor concentración de fase amorfa en el material CT10 respecto a MA, lo cual resulta lógico debido a que la ceniza volante contiene un alto contenido de fase sólida no cristalina (rica en silicio acorde con la información de la tabla 23).

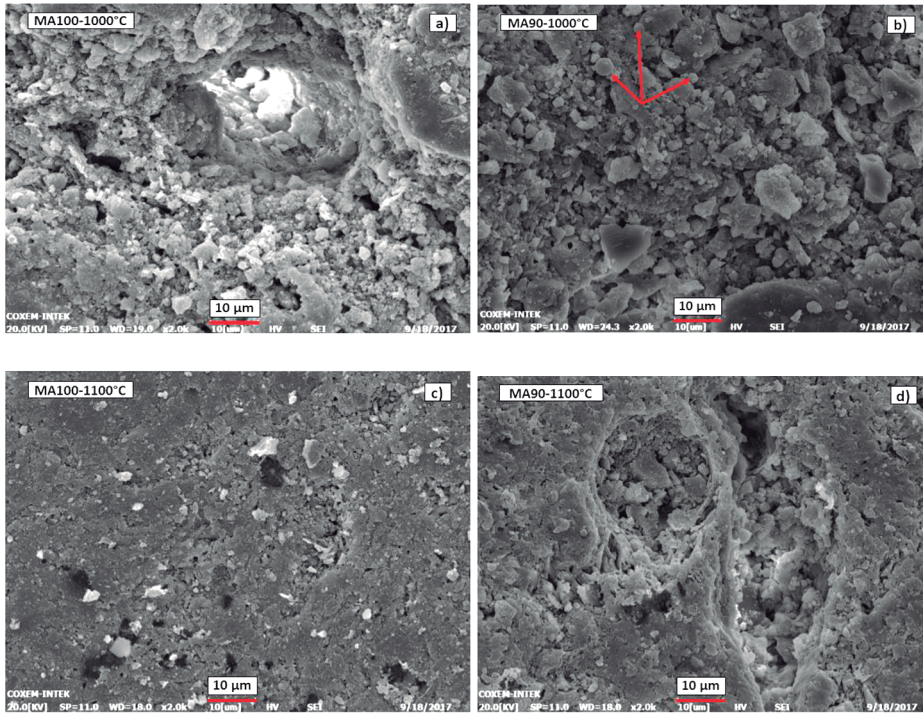
A temperaturas superiores es donde se dan los cambios. Al respecto, se podría pensar que la formación de fase vítrea (estado vítreo) parece tener alguna influencia en la velocidad de transformación de la fase amorfa hacia fase cristalina. En la tabla 35 se aprecia un incremento en el contenido de cuarzo en el cerámico (CT10) a los 1.100 °C, así como la aparición de cristobalita de baja temperatura en reemplazo de la fase amorfa de la ceniza rica en silicio. De igual manera, a los 1.200 °C se observa cómo se incrementa la cantidad de cristobalita en el material. En este último caso, su formación podría provenir de la fase amorfa residual identificada en 1.100 °C o de la transformación del cuarzo, que como se aprecia en la información de la misma tabla pasó de 57,7% a 42,9%; incluso podría provenir

del proceso de recristalización de la fase vítrea originada a partir de los minerales arcillosos identificados (caolinita y moscovita especialmente). Este último evento de recristalización también se ve reflejado en el aumento del contenido de mullita en el cerámico elaborado con la pasta CT10.

A partir del análisis realizado se puede llegar a realizar algunas correlaciones entre la microestructura del cerámico y las propiedades tecnológicas del material. El principal aspecto está asociado a una temperatura límite donde el proceso de recristalización es tan alto que afecta las propiedades del cerámico. Acorde con los resultados obtenidos en el apartado anterior, temperaturas de cocción superiores a los 1.150 °C no favorecen la resistencia mecánica a la flexión y a la abrasión profunda de los cerámicos (ver tablas 31 y 32). Estudios posteriores deberían desarrollarse a fin de encontrar el punto óptimo donde la cantidad de fase amorfa (vítrea en este caso) y cristalina, especialmente de mullita (ISO/TS 14067:2015) actúan de forma sinérgica para mejorar las propiedades tecnológicas del cerámico. Este comportamiento fue observado casi en todos los residuos utilizados en este trabajo; por tanto, se podría llegar a pensar que este comportamiento estaría influenciado por la composición mineralógica del material arcilloso.

A fin de obtener información adicional que permita explicar los resultados físico-cerámicos obtenidos para los cerámicos elaborados con el material MA y CT10, se empleó la técnica de microscopía electrónica de barrido a fin de adquirir información topográfica y morfológica de los cerámicos a diferentes temperaturas. Los resultados son presentados en la figura 53.

**Figura 53. Microscopia Electrónica de barrido para MA100 and MA90 a diferentes temperaturas (2000X)**



En relación con los resultados de microscopia electrónica de barrido, en la figura 53 se puede apreciar cómo la topografía del cerámico se ve afectada por la temperatura de cocción. Un efecto similar se da para los aspectos morfológicos, especialmente en la modificación de las partículas esféricas características de la ceniza volante (ver figura 53).

En concordancia con los resultados de DRX, se evidencia que en 1.000 °C aún persiste esta morfología esférica, que suele ser de carácter amorfo para el cerámico con inclusión de ceniza volante (figura 53 derecha, representado con el número b), pero arriba de 1.100 °C parecen no ser evidentes. Este material presenta similitudes de tipo topográfico al ser comparado con el cerámico elaborado con solo material arcilloso (ver figura 53).

A 1.100 °C se evidencia cómo el cerámico elaborado con solo material arcilloso adquiere un mayor grado de densificación producto de la formación de fase vítrea. Aun así, se llega a observar que todavía hay porosidad a nivel de superficie, con poros con tamaños de hasta 5 µm.

En relación con el cerámico de CT10, cocido a 1.100 °C, aunque se evidencia que el material ha incrementado la sinterización de los granos y que hay mayor grado

de vitrificación, también se logró observar la presencia de una gran cantidad de poros de tamaño inferior a  $1\ \mu\text{m}$  en el material. Este incremento de la porosidad posiblemente esté correlacionado a la recristalización de la fase amorfa conforme al análisis de DRX realizado. Este hecho también permite explicar los mayores valores de absorción de agua y la pérdida de resistencia mecánica arriba de los  $1.150\ ^\circ\text{C}$  descritos en el apartado anterior.

## CAPÍTULO VI

# EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL NUTRIENTE TECNOLÓGICO EN LA CAPACIDAD DE AISLAMIENTO TÉRMICO DEL MATERIAL

Acorde con la metodología establecida para medir la conductividad térmica, flujo (lineal transitorio de calor), se procedió a realizar las medidas para los cerámicos elaborados con los materiales MA100 y MA90 a diferentes temperaturas de cocción. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 36.

**Tabla 36. Variación de la conductividad térmica de MA100 and MA90 con incremento de temperatura**

Temperatura (°C)	Conductividad térmica (W/m.K)		
	MA100	CT90	CAb (5%)
900	0,336±0,02	0,376±0,01	0,277±0,01
1.000	0,407±0,02	0,488±0,03	0,375±0,01
1.100	0,691±0,01	0,548±0,01	0,462±0,01
1.150	0,777±0,02	0,594±0,03	0,473±0,01

De la tabla 36 es posible observar cómo la conductividad térmica del cerámico varía en función de la temperatura de cocción. Se evidencia que, a pesar de que el valor de esta variable se incrementa en los dos materiales, la velocidad de cambio es más marcada para el material MA100 después de sobrepasar los 1.000 °C. Por debajo de este valor de temperatura se evidencia que la conductividad térmica es más baja para el material elaborado con solo material arcilloso (MA100), es decir que el uso del 10% de ceniza volante como material sustituto no trae



ningún beneficio si lo que se busca es obtener un cerámico de construcción para cerramiento (que se fabrique por debajo de los 1.000 °C) que reduzca el flujo de calor.

Ahora, en temperaturas de cocción arriba de 1.100 °C el panorama es distinto, pues se logra una reducción de hasta el 23,5% en 1.150 °C con respecto al material de referencia. Sin embargo, es importante recordar que los valores de las demás propiedades tecnológicas de MA90 se ven desmejoradas respecto a MA100. Aun así, cumplen con los parámetros propuestos en la tabla 34 para uso como revestimiento y pisos de uso residencial y comercial. En cualquier caso, debe considerarse que esta mejora, aunque no sea de una magnitud elevada, es un elemento positivo más que añadir a las ventajas que supone el uso de las cenizas volantes como sustitutivo parcial de la arcilla cocida en la fabricación de cerámicos.

Estos cambios evidenciados sobre la conductividad térmica podrían estar asociados a muchos aspectos. A bajas temperaturas, podría tener relación con el grado de compactación del material y la microestructura presente en el cerámico. Sobre el efecto de la compactación, esta proposición se plantea debido al menor tamaño de grano de la ceniza volante, la cual podría favorecer el proceso de compactación acorde con los modelos propuestos en la literatura (empaquetamiento de granos, deformación plástica/elástica, entre otros) (Naciones Unidas, 1998). En cuanto a la microestructura en la literatura (ISO 14025:2006; Tiles & Bricks Europe, 2014; NTC 6033; EN 15804:2012), se ha evidenciado que algunas fases tanto cristalinas como amorfas pueden aumentar o reducir la conductividad térmica del material. Este caso resalta la presencia de mullita, cuarzo, fase amorfa de la ceniza y la misma materia orgánica residual presente en la ceniza y en el análisis de calorimetría diferencial de barrido presentado. Arriba de los 1.100 °C este cambio posiblemente esté muy asociado a las diferencias en la porosidad debido a la recristalización y a la oxidación de la materia orgánica residual, tal como se evidencia en los resultados de absorción de agua presentados en la tabla 30.

Como un aspecto complementario, se ha querido mostrar los resultados de conductividad térmica obtenidos para el cerámico elaborado con el material CC5, que fue el cerámico que mostró junto a MA90 los mejores comportamientos en cuanto a las propiedades tecnológicas del cerámico se refiere. Los valores se presentan en la tabla 37.

**Tabla 37. Variación de la conductividad térmica (en probetas cilíndricas) de los cerámicos elaborados con el material CC5 al incrementar la temperatura de cocción**

Temperatura (°C)	Conductividad térmica (W/m.K)
	CC5
900	0,257±0,01
1.000	0,325±0,02
1.100	0,347±0,01
1.150	0,360±0,01

De la tabla 37 se puede evidenciar que en el caso de la pasta CC5 (presencia de cisco de café) los valores de conductividad son más bajos que los obtenidos con el material de referencia (MA100), llegando a alcanzar una reducción de la conductividad térmica de hasta el 54% en 1.150°C.

La reducción de la conductividad térmica de los cerámicos obtenidos (MA90 y CC5) puede llegar a ser un aspecto de gran interés para el sector de la construcción en la zona de influencia de las empresas ladrilleras de la región. La zona metropolitana de Cúcuta se caracteriza por ser un territorio con un ambiente cálido donde la temperatura promedio está en torno a los 27 °C, pero con valores máximos durante el día que superan los 33 °C como producto de las características propias de la zona y de la cantidad de brillo solar de esta, la cual es de 185 horas por mes, es decir, cerca de seis horas al día. Los datos estadísticos no muestran muchas variaciones durante el año (Amell *et al.*, 2016).

Bajo estas condiciones, la población que habita en esta región se ve inmersa en un ambiente caluroso dentro de sus hogares y centros de trabajo, lo que obliga a que exista la necesidad del uso de sistemas de refrigeración y ventilación mecánica a fin de disminuir la sensación de calor. Bajo este panorama, el desarrollo de materiales de construcción para cerramientos o revestimientos exteriores que posean una baja conductividad térmica permitirá que el proceso de conducción de calor (de las paredes expuestas al sol) hacia el interior de las construcciones sea menos eficiente, logrando así disminuir la temperatura en el interior de los recintos. De igual manera los sistemas de refrigeración podrán llegar a ser más eficientes bajo el mismo principio.

## 24. Simulación del comportamiento de un bloque hueco de arcilla con adición de cascarilla de arroz, cenizas volantes y cisco de café

Se realizó la validación del programa de simulación (ANSYS16®). Los datos de conductividad térmica suministrados para los materiales de fabricación del bloque son:

- $k_{\text{Arcilla}} = 0,691 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ .
- $k_{\text{Cenizas volantes}} = 0,548 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ .
- $k_{\text{Cascarilla de arroz}} = 0,462 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ .
- $k_{\text{Cisco de café}} = 0,347 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ .

Los datos de las condiciones del entorno de Cúcuta se toman del IDEAM para el mes de septiembre, y son:

- Temperatura máxima promedio =  $33 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Radiación solar máxima promedio =  $796,80 \text{ W.h/m}^2$ .
- $\Delta t = 12:00 \text{ horas a } 13:00 \text{ horas} = 1 \text{ hora}$ .
- $Q_{\text{Solar}} = 796,8 \text{ W/m}^2$ .
- Velocidad promedio del viento =  $4 \text{ m/s}$ .

### 24.1 Datos calculados

El coeficiente de transferencia de calor por convección es el valor que depende de la velocidad del viento y las condiciones de temperatura y presión en las que se encuentra.

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot k}{L_c} \quad (1)$$

Donde:

$h$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección.

$\text{Nu}$ : Número de Nusselt.

$k$ : Conductividad térmica del aire.

$L_c$ : Longitud característica asumida de  $20 \text{ cm}$ .

El número de Nusselt es un valor adimensional que describe el aumento en la transferencia de calor sobre una superficie. Para la sección transversal rectangular y flujo cruzado, es:

$$Nu: 0,102Re^{0,675}Pr^{1/3} \quad (2)$$

Donde:

Re: Número de Reynolds.

Pr: Número de Prandtl.

El número de Reynolds es un valor adimensional que describe el comportamiento del flujo de aire sobre la superficie del bloque.

$$Re = \frac{\rho * V * L_c}{\mu} \quad (3)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del aire.

V: Velocidad del viento.

$\mu$ : Viscosidad dinámica del aire.

Las propiedades del aire a temperatura de 33 °C se toman de la tabla A-15 la cual se encuentra en el libro de transferencia de calor y masa) (Cengel, 2007):

$\rho$ : 1,1526 kg/m<sup>3</sup>.

V: 0,026102 W/m\*°C.

$\mu$ : 0,000018858 kg/m.s.

Pr: 0,72736.

Reemplazando los valores en orden de las ecuaciones (3), (2) y (1), se obtiene como resultado un coeficiente de transferencia de calor por convección de  $h = 17,5154 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , que se aplicará a la sección exterior de la geometría, donde tiene efecto la velocidad del viento.

Para las superficies que no están encerradas, como cámaras de aire internas, se asume un coeficiente de transferencia de calor por convección natural de  $h = 5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , teniendo en cuenta los valores de la tabla A-15.

## 24.2 Procedimiento

- Diseño asistido por computador (CAD)

Con el software SOLIDWORKS 2017 se ajusta el CAD del bloque H10 y se guarda en extensión parasolid, para posteriormente importar en ANSYS R16.

- Ingeniería asistida por computador (CAE)

Se utiliza el método de los elementos finitos (FEM) para realizar la simulación del bloque con el software ANSYS R16.

- *Project Schematic*

Cada simulación se solventa en siete pasos:

1. *Analysis System Type*: Se realiza el esquema del proyecto conformado por *Analysis System* del tipo *Steady State Thermal*, donde se trabaja una sola geometría, que posteriormente se relaciona a los análisis donde la variable es el material de fabricación y, por lo tanto, su conductividad térmica:
  - a) Bloque H10.
  - b) Arcilla.
  - c) Cenizas volantes.
  - d) Cascarilla de arroz.
  - e) Cisco de café.
2. *2Engineering Data*: Se introducen las propiedades de los materiales en la base de datos de ANSYS R16 utilizando el *Engineering Data Source*.
3. *Geometry*: Se realiza la importación del CAD del bloque en el *Design Modeler* y se optimiza la geometría al realizar limpieza de la superficie con corrección de caras y bordes.
4. *Model*: A partir de este paso se trabaja en la interfaz *Mechanical* de ANSYS R16. Inicialmente se realiza la asignación de material. El siguiente paso es realizar el mallado de las pizas. Se configura la malla para que utilice el tipo de preferencia física CFD y el solucionador *Fluent*.
5. *Setup*: Las condiciones a las que está sometido el bloque H10. En la cara frontal se aplica la condición exterior de viento y radiación solar, y en la cara trasera se aplica la condición interior de convección natural:
  - A: Convección ( $5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ).
  - B: Convección ( $17,5154 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ).
  - C: Flujo de calor ( $796,8 \text{ W/m}^2$ ).

6. *Solution:* Para el análisis de los bloques se aplican las dos soluciones más relevantes:
- » Distribución de temperatura.
  - » Flujo total de calor.
7. *Results.*

### 24.3 Resultados

Los resultados para comparar los diferentes materiales de fabricación del bloque H10 se observan en la tabla 38, según los resultados de la distribución de temperatura obtenida en las simulaciones. Para la tasa de transferencia de calor por conducción a través de los puentes térmicos se usa la ecuación:

$$Q_{\text{conducción}} = k_{\text{material}} \cdot A_{\text{transversal}} \cdot \frac{(T_{\text{exterior}} - T_{\text{interior}})}{l}$$

En donde el área transversal se halla con la longitud del bloque (30 cm) y el espesor del puente térmico (6 mm). Adicionalmente, se toma la distancia entre las caras interior y exterior como la distancia de conducción del calor ( $l$ ).

Además:

$Q_{\text{conducción}}$ : Tasa de transferencia de calor por conducción.

$K_{\text{material}}$ : Conductividad térmica del material.

$A_{\text{transversal}}$ : Sección transversal del puente térmico.

$T_{\text{exterior}}$ : Temperatura exterior.

$T_{\text{interior}}$ : Temperatura interior.

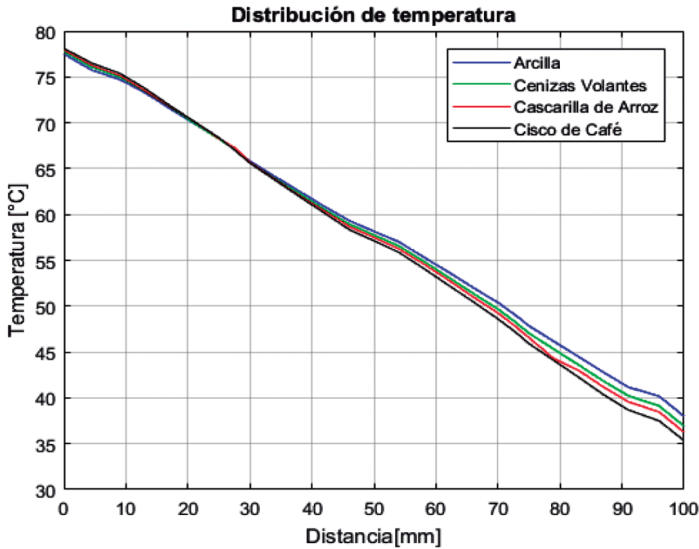
$l$ : Distancia de conducción del calor.

**Tabla 38. Temperatura exterior e interior**

Material	Temperatura exterior (°C)	Temperatura interior (°C)	$Q_{\text{conducción}}$ (W)
Arcilla	77,50	37,99	0,49
Cenizas volantes	77,76	36,92	0,40
Cascarilla de arroz	77,91	36,25	0,35
Cisco de café	78,10	35,34	0,27

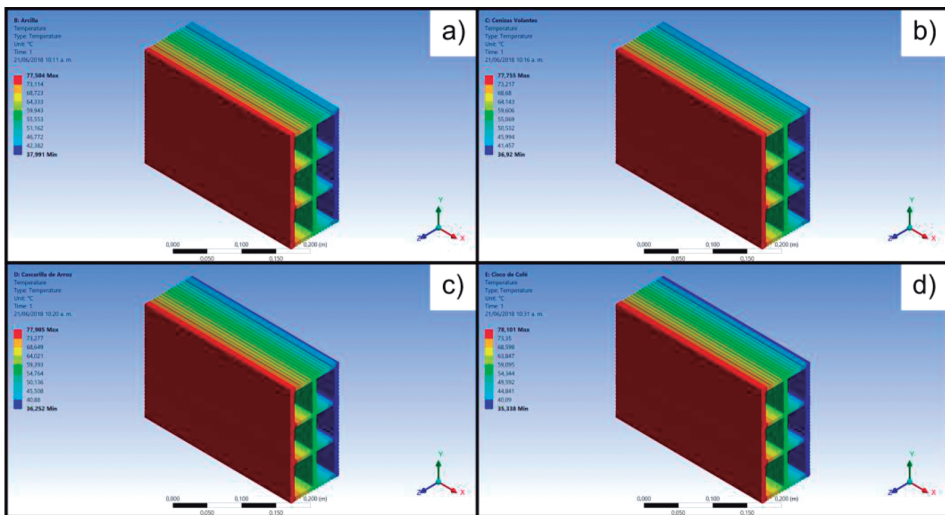
En la figura 54 se observa con detalle la comparativa de la distribución de temperatura promedio en los puentes térmicos del bloque H10 para los diferentes materiales.

**Figura 54. Distribución de temperatura a lo largo de los puentes térmicos**



A continuación se presenta la figura 55, correspondiente a la distribución de temperatura comparando los casos utilizados.

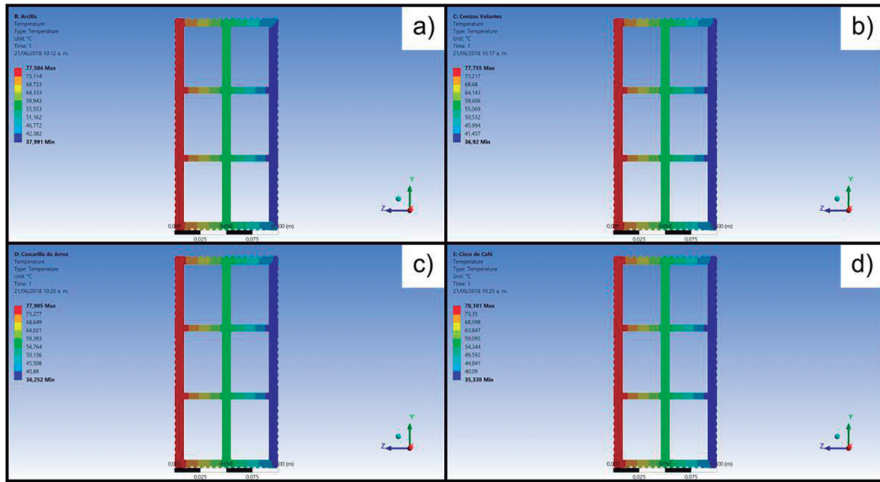
**Figura 55. Vista isométrica: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café**



De la figura 55 se puede determinar que, bajo las condiciones de simulación, la adición del cisco de café disminuye la transferencia de calor a través del bloque hueco más que los otros nutrientes tecnológicos.

A continuación se puede observar, en la figura 56, el comportamiento del perfil de temperaturas en la vista lateral del bloque para cada uno de los casos estudiados. Cabe destacar que se utilizó el mismo rango de temperaturas para que se pueda percibir la variación que existe entre cada uno de los estudios realizados.

**Figura 56. Vista lateral: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café**



En las figuras 57 a la 59 se observa el comportamiento del flujo total de calor en diferentes vistas del bloque para cada uno de los casos estudiados.

**Figura 57. Vista isométrica: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café**

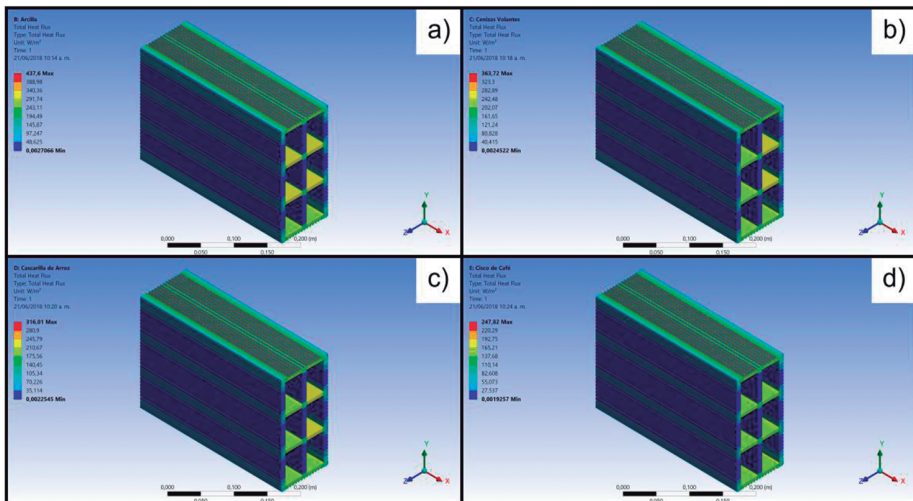




Figura 58. Vista lateral: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café

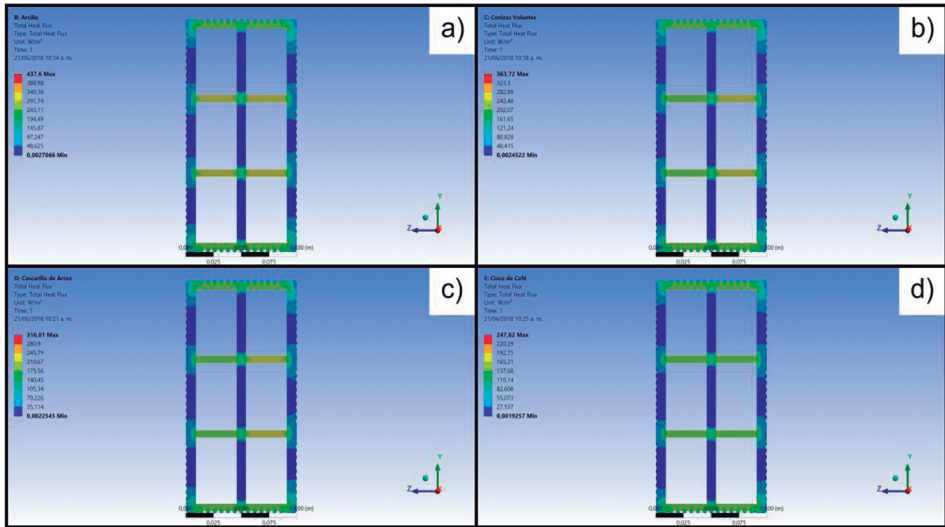
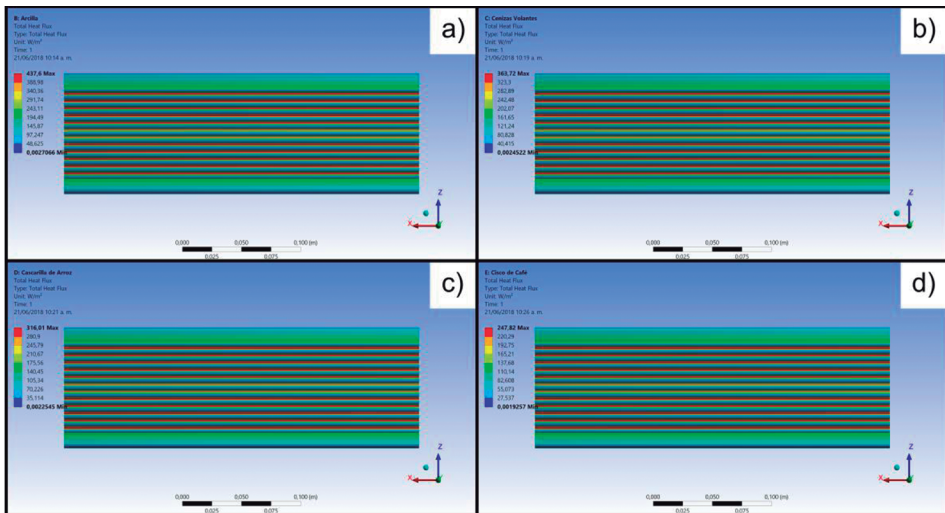


Figura 59. Vista superior: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café



## CAPÍTULO VII

# EFECTOS ENERGÉTICOS/ AMBIENTALES DE LA PRESENCIA DEL NUTRIENTE TECNOLÓGICO EN EL MATERIAL CERÁMICO DE MEJOR COMPORTAMIENTO

### **25. La huella de carbono en el ámbito de la economía circular**

Existe una total relación entre la aplicación de los principios de la economía circular en la industria cerámica y la huella de carbono (e, implícitamente la energía embebida) de los productos. No en vano, la reducción del uso de los recursos y la generación de residuos lleva asociada una reducción del consumo de energía y de la huella de carbono de los productos.

Esta afirmación se fundamenta en el principio básico de la economía circular, que es cerrar el ciclo de vida de los productos, servicios, residuos, materiales, agua y energía. Así, el residuo se convierte en recurso que vuelve a la naturaleza sin causar daños medioambientales al no agotar su vida útil, reduciendo la utilización de materias primas vírgenes (enfoque *Cradle to cradle*).

No cabe duda de que, al devolver al residuo la calidad de materia prima, se está reduciendo el impacto ambiental asociado tanto al proceso de extracción de materias primas de la naturaleza como al tratamiento que se da a los residuos al final de su vida útil, lo que se traduce a su vez en una disminución de la huella de carbono.

Por otra parte, al relacionar productos de construcción, economía circular y reducción de impactos ambientales, es necesario tener en consideración que el

impacto ambiental de un edificio comienza desde el mismo momento en que se extraen las materias primas para la fabricación de los productos de construcción. Por lo tanto, las ventajas medioambientales de un material de construcción redundarán en un mejor comportamiento medioambiental del edificio y, por extensión, una inestimable contribución al desarrollo sostenible del planeta por parte del sector de la construcción, responsable del 50% de las emisiones de CO<sub>2</sub> y que consume el 60% de los recursos no reutilizables del planeta.

Se debe afirmar, por tanto, que el uso de nutrientes tecnológicos como materia prima en la fabricación de productos cerámicos, como mecanismo para la reducción del impacto ambiental asociado a estos, repercute positivamente en la contribución al desarrollo sostenible del sector de la construcción.

En lo referente a los impactos medioambientales propiamente dichos, la lucha contra el cambio climático es un elemento clave por considerar en el desarrollo de productos de construcción, puesto que el cambio climático representa una de las mayores amenazas ambientales, sociales y económicas del planeta. Como consecuencia del cambio climático, la temperatura media de la tierra ha aumentado 0,76 °C desde 1850 y, de mantenerse las tendencias actuales de emisiones, es posible que en el año 2050 la temperatura media de la tierra suponga, según el informe Stern, además de los importantes impactos sociales y medioambientales, enormes esfuerzos económicos en mitigación y adaptación a la nueva situación.

Las acciones que se están llevando a cabo a nivel internacional en la lucha contra el cambio climático son muy conocidas. Entre todas ellas se destaca en particular la firma del Protocolo de Kioto, compromiso internacional para reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, refrendado en posteriores convenciones de Naciones Unidas en Doha y París.

Sin embargo, para poder determinar el beneficio, desde el punto de vista medioambiental, que supone el uso de nutrientes tecnológicos en la fabricación de productos cerámicos, es necesario disponer de información objetiva del costo ambiental y del consumo energético de ese producto, puesto que lo que no se mide no se controla ni se reduce.

Así, es necesario conocer, con carácter previo, las magnitudes de los impactos ambientales de un producto cerámico convencional, que serán la base para la evaluación y validación de la mejora que supone, desde el punto de vista medioambiental, el uso de nutrientes tecnológicos en la industria cerámica. Las herramientas de mayor relevancia para conocer, cuantificar y actuar sobre estos impactos son la “huella de carbono” y la cuantificación de la “energía embebida” de los productos.

Estas herramientas son de especial utilidad en el sector de los productos cerámicos con miras a que la reducción de la emisión de GEI sea un elemento clave

a nivel internacional en las políticas de desarrollo sostenible. Dicho sector es, después de todo, de uso intensivo de energía y generador de altas cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Por tanto, los conceptos de la economía circular y la medida de la huella de carbono y energía embebida se encuentran muy relacionados, como elementos de evaluación y medida de la reducción del impacto ambiental que supone el uso de residuos como materias primas en la fabricación de productos cerámicos.

## 26. La huella de carbono

La huella de carbono (HdC) se define, según el informe ISO/TS 14067:2013, como el “Sumatorio de emisiones de gases de efecto invernadero (y retirada) en un sistema de producto, expresado como CO<sub>2</sub> equivalente y basado en una evaluación del ciclo de vida”.

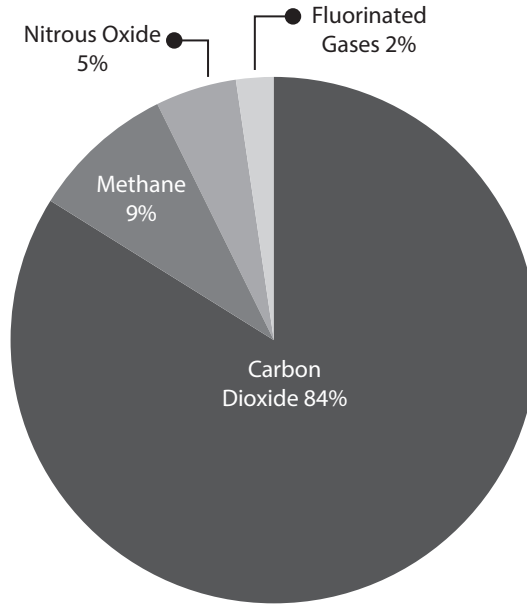
Se puede decir que la HdC es una versión simplificada de un análisis de ciclo de vida en el que se analiza la categoría de impacto asociada al calentamiento global. La HdC está considerada en la actualidad como una herramienta válida, internacionalmente aceptada, de evaluación ambiental de productos y servicios. Surge como una medida de la cuantificación del efecto de los GEI en el medioambiente, ya que permite que las emisiones de estos puedan cuantificarse, comprobarse y gestionarse, lo que hace posible comparar la HdC entre diferentes productos, actividades o servicios. La HdC tiene en cuenta todos los GEI que contribuyen al calentamiento global, para después convertir los resultados individuales de cada gas a equivalentes de CO<sub>2</sub>. Por ello, el término correcto es HdC equivalente o emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes (CO<sub>2</sub><sub>equiv</sub>).

Se denominan GEI a los gases cuya presencia en la atmósfera contribuye al efecto invernadero. Los más importantes están presentes en la atmósfera de manera natural, pero también entran en este concepto algunos gases artificiales, producto de la industria. Esos gases contribuyen más o menos de forma neta al efecto invernadero. Los GEI, entonces, tal como están recogidos en el Anexo A del Protocolo de Kioto, son:

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).
- Metano (CH<sub>4</sub>).
- Óxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O).
- Hidrofluorocarburos (HFC).
- Perfluorocarburos (PFC).
- Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el elemento que más contribuye al efecto invernadero acentuado (artificial), siendo responsable de más del 80% del efecto invernadero.

**Figura 60. Reparto de las emisiones de GEI en países industrializados (Gelves *et al.*, 2013)**



De igual forma, no todos los GEI tienen el mismo potencial de calentamiento global, dando como valor de referencia 1 al  $\text{CO}_2$  (ver tabla 39).

**Tabla 39. Potencial de calentamiento global de los GEI**

Gas	Fórmula	Potencial de calentamiento IPCC 1995
Dióxido de carbono	$\text{CO}_2$	1
Metano	$\text{CH}_4$	21
Óxido nítrico	$\text{N}_2\text{O}$	310
Hidrofluorocarburos		
HFC-23	$\text{CHF}_3$	11.700
HFC-32	$\text{CH}_2\text{F}_2$	650
HFC-41	$\text{CH}_3\text{F}$	150
HFC-43-10mee	$\text{C}_5\text{H}_2\text{F}_{10}$	1.300
HFC-125	$\text{C}_2\text{HF}_5$	2.800
HFC-134	$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4(\text{CHF}_2\text{CHF}_2)$	1.000
HFC-134a	$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4(\text{CH}_2\text{FCF}_3)$	1.300

Gas	Fórmula	Potencial de calentamiento IPCC 1995
HFC-152a	$C_2H_4F_2(CH_3CHF_2)$	140
HFC-143	$C_2H_3F_3(CHF_2CH_2F)$	300
HFC-143a	$C_2H_3F_3(CF_3CH_3)$	3.800
HFC-227ea	$C_3HF_7$	2.900
HFC-236fa	$C_3H_2F_6$	6.300
HFC-245ca	$C_3H_3F_5$	560
Perfluorocarburos		
Perfluorometano	$CF_4$	6.500
Perfluoroetano	$C_2F_6$	9.200
Perfluoropropano	$C_3F_8$	7.000
Perfluorobutano	$C_4F_{10}$	7.000
Perfluorociclobutano	$c-C_4F_{10}$	7.000
Perfluorociclobutano	$c-C_4F_8$	8.700
Perfluoropentano	$C_5F_{12}$	7.500
Perfluorohexano	$C_6F_{14}$	7.400
Hexafluoruro de azufre	$SF_6$	23.900

La normativa de aplicación para el cálculo de la HdC y cuantificación de los GEI se corresponde con la familia de normas ISO (International Standard Organization), comprendidas entre la ISO 14064 y la 14069, que tienen como objetivo dar credibilidad y aseguramiento a los estudios de emisión de GEI y a las declaraciones de reducción o eliminación de GEI. La norma de referencia, a nivel internacional, de cálculo de HdC es ISO 14.067 (Mora, 2015): *Huella de carbono de productos-requerimientos y directrices para cuantificación y comunicación*. Esta norma toma como base la metodología de ciclo de vida de las normas ISO 14040 y 14044 (Lombana, 2011) y especifica criterios y requisitos específicos para los estudios de cuantificación de HdC.

## 26.1 Métodos de cálculo

No se cuenta con un marco metodológico común y uniforme sobre el cálculo de la HdC. Para cuantificar la HdC, debe aplicarse un determinado protocolo de estimación y contabilidad de emisiones de GEI. Dentro de las metodologías de cálculo existentes, la más adecuada para el caso de los productos de construcción es el PAS 2050 (Especificaciones Públicamente Disponibles). Este método, elaborado por el Instituto Británico de Estandarización, se presenta como una guía metodológica que describe paso a paso los criterios para determinar y tomar

en cuenta, está enfocado al cálculo de las emisiones de productos y servicios, y responde a las normativas ISO y a las del Protocolo GEI.

La metodología define inicialmente las fuentes de emisiones consideradas, además de cinco grandes bloques de actividades, cuyas emisiones deben ser contempladas en la estimación del ciclo de vida de bienes y servicios. Con la enumeración de las fuentes de emisiones consideradas, se realiza una acotación general del ámbito al que se aplica el indicador. La HdC es calculada adicionando los varios factores que inciden en la producción de GEI. Un modelo simple es la suma ponderada de los diversos factores, como se describe en la siguiente ecuación:

$$HC = \sum x_i * y_i * F_i$$

En esta ecuación general,  $x_i$  e  $y_i$  son factores de conversión y equivalencia que dependerán del tipo aplicación y magnitud y de la influencia de la variable  $F_i$  (uso de carbón o gas natural, emisiones directas o indirectas, kilómetros recorridos, etc.).

### 26.1.1 Energía embebida

La energía embebida ( $E_e$ ), en el caso concreto de los productos cerámicos, es un concepto íntimamente ligado a la huella de carbono puesto que en la medida de la energía embebida de un producto están implícitos los impactos asociados a los GEI.

La  $E_e$  se define como la suma de toda la energía necesaria para producir bienes o servicios, considerados como si esa energía se incorporara en el propio producto (Smykatz-Kloss, 1974). En términos específicos de productos cerámicos, la energía embebida se asocia al consumo energético derivado de la adquisición de las materias primas, la necesaria para su elaboración/fabricación, y su transporte hasta el lugar de construcción del edificio.

A diferencia de la HdC, no existe una normativa internacionalmente aceptada para el cálculo de la  $E_e$  de productos. Convencionalmente, para productos de construcción, la energía incorporada se mide como una cantidad de energía no renovable por unidad de material, expresada como megajulios (MJ) o gigajulios (GJ) por unidad de peso (kilogramo o tonelada). La cantidad total de energía es lo que se denomina energía embebida o incorporada. De la misma forma, los diferentes métodos de cálculo actuales pueden producir resultados muy diferentes. La fórmula de cálculo de la  $E_e$  sería la siguiente:

$$E_e = \sum m_i * M_i$$

Donde:

$E_e$ : Energía embebida.

$m_i$ : Cantidad de material.

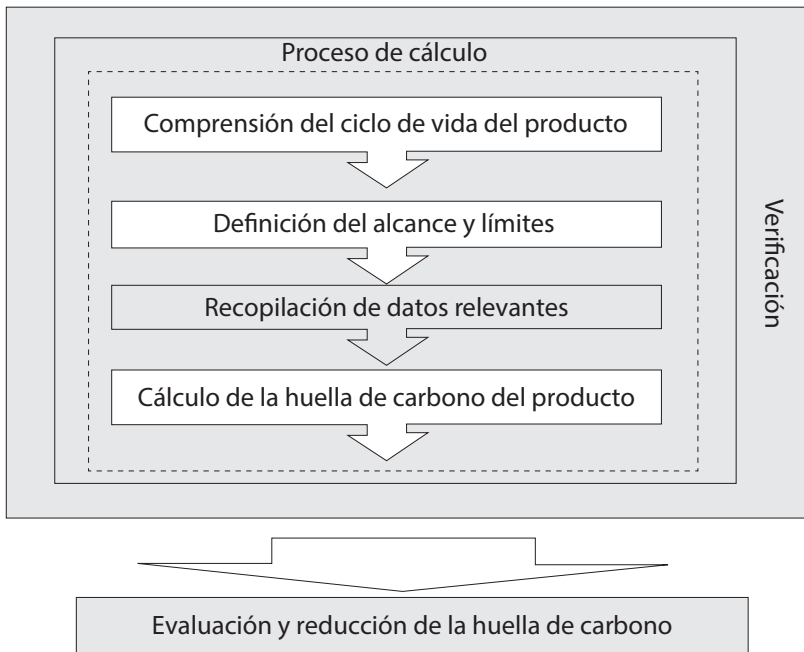
$M_i$ : Contenido energético por unidad de material.

Como se ha comentado, en el caso concreto de productos cerámicos, la importante relación que existe entre ellos y el consumo energético (son fabricados con uso intensivo de energía) hace que el estudio de su Ee haya adquirido una gran importancia como información relevante de impacto ambiental. Hay que tener en cuenta que la Ee de un producto debe estar referida a la *energía primaria*, definida esta como la cantidad total de recursos energéticos consumidos, ya sea directamente o para su transformación en otra forma de energía. El indicador de energía primaria se expresa habitualmente en kilotoneladas equivalentes de petróleo (ktep), aunque también puede expresarse en MWh (o kWh).

### 26.1.2 Metodología de cálculo de HdC y Ee de la aplicación de los nutrientes tecnológicos

El cálculo de la HdC (y Ee) en la presente tesis se realiza siguiendo la metodología descrita en PAS 2050 y el informe ISO/TS 14067:2013. De manera sencilla, la metodología tipo que se debe seguir es la que se muestra en la figura 61.

**Figura 61. Pasos para el cálculo de la HdC (PAS 2050:2011)**





1. **Compresión del ciclo de vida del producto cerámico. Construcción del mapa de procesos del producto objeto de la tesis:** Partiendo de una identificación de todos los materiales, actividades y procesos que contribuyen en el ciclo de vida del producto, se genera el mapa de procesos. Este representa el ciclo de vida de la unidad funcional o declarada definida para el producto por estudiar. Se tiene en cuenta tanto el proceso convencional de producción de los productos cerámicos como las etapas y/o procesos que son modificados/eliminados con la introducción de los nutrientes tecnológicos.
2. **Definición de alcance y límites del sistema:** Una vez definido el mapa de procesos, se limita el alcance del análisis con base en los objetivos de la presente tesis, concretando las fases que componen los procesos que van a ser objeto de estudio. La metodología basada en PAS 2050 establece unos criterios que permiten definir claramente este alcance del análisis. Se define la unidad funcional del producto cerámico.
3. **Recopilación de datos relevantes:** Una vez definidos el mapa de procesos y las fases de estos, se realiza la recopilación de la información que permita estimar las emisiones de GEI por unidad funcional de producto cerámico, tanto de datos de primer orden (planta de producción de cerámica y de producción de las empresas donde se generan los residuos utilizados como nutrientes tecnológicos) como de bases de datos, contrastadas a nivel nacional e internacional.
4. **Cálculo. Aplicación de metodología:** Una vez obtenidos los datos de las distintas materias, actividades y procesos relacionados con el ciclo de vida del producto cerámico, se realizan los balances de masas de cada fase del proceso y se aplican los correspondientes factores de emisión. El conjunto de emisiones generadas a lo largo de las etapas que se incluyen dentro del mapa de procesos da lugar a las emisiones de  $\text{CO}_{2\text{equiv}}$  por unidad funcional o declarada de producto.
5. **Análisis de incertidumbre:** En función de la procedencia de la información utilizada en el cálculo, la precisión de los resultados obtenidos será mayor o menor. Para reducir la incertidumbre del proceso, se deberá utilizar, siempre que sea posible, información de primer orden. En el caso de que sean datos secundarios, se procurará que las fuentes se encuentren actualizadas y sean fiables. Al finalizar la evaluación se analizará la posibilidad de actualizar algunos datos para llegar a resultados más precisos.

En la presente tesis, el cálculo de la reducción de HdC y Ee se realiza tanto para la etapa de fabricación de producto como para la etapa de uso del edificio donde es colocado el producto cerámico, en el que se sustituye parte de las materias primas por nutrientes tecnológicos.

El análisis y evaluación se realiza, en primer lugar, a partir de los datos obtenidos en la fase de inventario del sistema de producción convencional. Posteriormente,

se realiza el cálculo considerando la entrada de los nutrientes tecnológicos objeto de la presente investigación en el proceso de producción cerámico, con base en la dosificación óptima considerada como resultado del estudio tecnológico de probetas.

En la etapa de cocción de producto, se realiza análisis de las diferencias que se obtienen en un proceso de cocción con horno colmena respecto de un proceso de cocción con horno túnel.

Los resultados de HdC y Ee del proceso de producción convencional son comparados con los que se obtienen respecto del proceso de producción utilizando nutrientes tecnológicos. De este modo es posible evaluar, desde el punto de vista medioambiental, la repercusión que tiene el uso de nutrientes tecnológicos en el proceso de fabricación de productos cerámicos.

En la etapa de la vida útil de la edificación, el cálculo de HdC y Ee se realiza a partir de los valores de los coeficientes de conductividad que se obtienen. Así se puede cuantificar el teórico ahorro energético en la vida útil del edificio que supondría el uso del nuevo producto cerámico con nutrientes tecnológicos respecto del uso de un producto cerámico convencional, así como respecto del uso de productos de construcción sustitutivos de los productos cerámicos.

De esta forma se obtienen magnitudes de cuantificación y evaluación del impacto ambiental, que sirven para determinar, de manera clara y objetiva, la contribución de los nuevos productos desarrollados a la implantación del concepto de economía circular en el proceso de producción de la industria cerámica del área metropolitana de Cúcuta.

## **27. Metodología para el cálculo de la huella de carbono**

Se realiza un análisis comparativo de la huella de carbono del producto convencional respecto del producto innovador, que presenta un 10% en masa de ceniza volante como materia prima, en sustitución parcial de la arcilla.

El cálculo de la huella de carbono se realiza siguiendo la metodología descrita en PAS 2050 y en la norma ISO 14067. Una vez definido el mapa de procesos (etapa 1), se seleccionan los parámetros de estudio más relevantes dentro de la información medioambiental de un producto.

Se determinan el alcance y los límites del sistema, fijando así mismo los parámetros por estudiar (etapa 2), y se procede a obtener toda la información necesaria para lograr la mayor cantidad de datos posibles que conduzcan a alcanzar los objetivos planteados (etapa 3). Enseguida, se define un protocolo estándar de recogida de datos para el inventario de emisiones de GEI expresados en el Anexo A del

protocolo de Kioto (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CFC, PFC, HF<sub>6</sub>) (Segerson & Miceli, 1998) y energía, así como un método de evaluación y valoración de los datos recogidos, teniendo en cuenta las directrices que marcan las series de norma ISO que le son de aplicación.

Para el estudio comparativo se toma como caso representativo la producción de una empresa del sector cerámico del área metropolitana de Cúcuta. Se considera el proceso de producción de manera comparativa con el resultado que se obtendría de sustituir, durante el mismo proceso productivo, el 10% de materia prima por nutriente tecnológico (ceniza volante).

La recogida de datos/información se realiza por dos vías distintas:

- Información de primer orden: Recogida de información de fábrica de producción y de canteras. En este caso de estudio se tomará una ladrillera del sector cerámico y, como suministradora de materia prima, una mina de El Zulia y la central termoeléctrica (ceniza volante).
- Información de segundo orden: Recopilación bibliográfica de estudios llevados a cabo en la materia objeto de bases de datos contrastadas, así como de factores de conversión para cálculo de las emisiones.

Luego se hace la evaluación de los datos y se calcula la huella de carbono y la energía embebida (etapa 4), mediante homogeneización y depuración, con base en factores de emisión y conversión internacionalmente aceptados, tomados en la recopilación de datos de segundo orden.

Para la construcción del mapa de procesos, se incluyen todos los apartados correspondientes a la primera etapa del proceso de cálculo de la huella de carbono, referentes a la compresión del producto y su ciclo de vida.

El mapa de procesos representa el ciclo de vida de la unidad funcional o declarada definida para el producto que se va a estudiar, lo que permitirá situar las fuentes de emisión en un diagrama que refleje las etapas que conforman el alcance del cálculo. Esto ayuda, entre otras cosas, a identificar qué actividades podrían ser críticas a la hora de abordar planes de reducción de impactos ambientales.

Los mapas de proceso sintetizan las diferentes adecuaciones y transformaciones que sufren las materias primas hasta convertirse en el producto final, en este caso el producto cerámico, de un modo gráfico.

Los procesos del ciclo de vida, con carácter genérico, del producto cerámico objeto de la tesis se pueden resumir en los siguientes:

- Extracción de materias primas (minas).
- Transporte de materias primas a planta.

- Molienda.
- Moldeo.
- Secado.
- Cocción.
- Clasificación y empaque.
- Transporte a destino final.
- Puesta en obra.
- Mantenimiento de la edificación.
- Demolición de la edificación (fin de la vida útil) y tratamiento del residuo al final.

## 28. Reglas de Categoría de Producto

De acuerdo con los requerimientos de la normativa por aplicar en el presente estudio, al realizar el cálculo de la huella de carbono es necesario seguir unas determinadas reglas, requisitos y pautas específicas, recopiladas en las Reglas de Categoría de Producto (RCP).

Del análisis a nivel internacional en este particular, se comprueba la disparidad que existe entre RCP de distintos programas en cuanto al alcance, los límites del sistema y los impactos, así como las diferencias específicas en los elementos técnicos. Esto refleja principalmente los diferentes propósitos de la RCP (por ejemplo, etiqueta/informe), las diferentes normas en las que se basan (por ejemplo, ISO 14025/PAS 2050), el uso de distintos sistemas de clasificación de productos, o simplemente el resultado de ser desarrolladas de forma independiente.

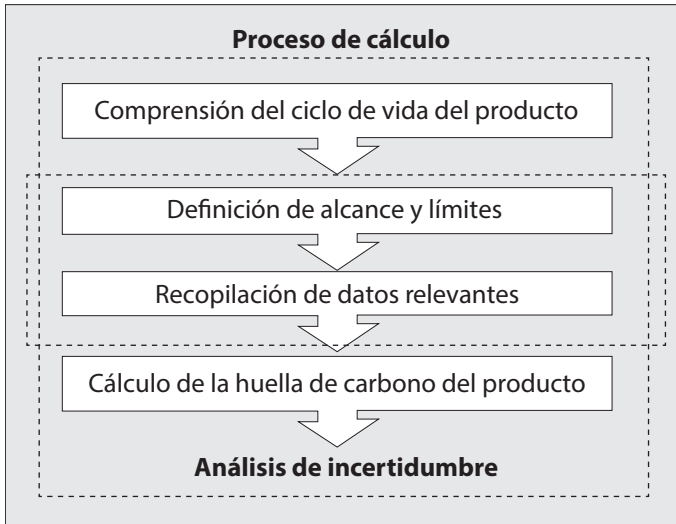
La Asociación Europea de Fabricantes de Productos Cerámicos TBE ha publicado recientemente el documento *TBE PCR for Clay Construction Products: Guidance Document for Developing an EPD* (Tiles & Bricks Europe, 2014). Este documento describe los parámetros y la metodología que se debe seguir en el desarrollo de DAP (Declaraciones Ambientales de Producto) para productos cerámicos a nivel europeo.

Al no existir RCP específica para los productos de cerámica estructural en Colombia (más allá de las indicaciones que marca el sello ambiental Colombiano, NTC 6033), se siguen en el presente análisis comparativo las reglas marcadas en la Norma 15084, teniendo también como referencia las RCP desarrollada por TBE y con el apoyo de las RCP desarrolladas a nivel internacional para productos cerámicos.

## 28.1 Establecimiento de límites y alcance

Se corresponde con la segunda etapa del cálculo de la huella de carbono y contiene los procesos de selección de productos, definición de la unidad funcional y establecimiento de los límites del sistema.

**Figura 17. Etapa de definición de alcance y límites en el proceso de cálculo (PAS 2050:2011)**



## 28.2 Definición de la unidad funcional/unidad declarada

La unidad funcional o la unidad declarada ofrecen una referencia para que los datos ambientales puedan normalizarse y deben estar relacionadas con las funciones típicas de los productos.

La unidad funcional cuantifica las funciones o las características de prestación de un sistema del producto cuando se considera el ciclo de vida completo de este. En este orden de ideas, la unidad funcional de un producto de construcción debe basarse en el uso funcional o las características prestacionales cuantificadas relevantes de este cuando es integrado en un edificio, así como en la vida de servicio de referencia del producto bajo condiciones estándares definidas. Aunque siempre es recomendable que la unidad funcional esté relacionada con la utilidad del producto, se ha comprobado que estudios similares utilizan la masa como unidad declarada. Así, se tiene el kilogramo o tonelada de producto cerámico acabado en lugar de utilizar el metro cuadrado de unidad constructiva de la que forma parte o unidad de pieza.

Por su parte, la unidad declarada es la cantidad de un producto que se utiliza para expresar la información ambiental contenida en los módulos de información. Se

aplica en vez de la unidad funcional cuando el estudio solo se basa en uno o más módulos de información en lugar del ciclo de vida completo.

La unidad declarada proporciona una referencia por medio de la cual el módulo de información del flujo de materiales normaliza al producto de construcción (en un sentido matemático). Esta unidad se relacionará con las funciones típicas de productos. Cuando es un estudio “cuna a puerta” no se consideran todas las etapas del ciclo de vida de los productos por lo que los datos hacen referencia a la unidad declarada y no de la unidad funcional.

Las razones son varias. Por una parte, se ha podido constatar que las industrias cerámicas, por regla general, registran datos referentes a producción por unidad de masa de producto fabricado. Por otra parte, se sabe que en una misma unidad funcional, por ejemplo metro cuadrado de fachada, el número de piezas que entran a formar parte puede variar considerablemente dependiendo de diseño de la fachada (ancho de llaga y tendeles, espesor de la fábrica, etc.) y del tipo de pieza que se utilice (dimensiones). Ahora bien, conociendo el impacto por unidad de masa de producto se podrá conocer el impacto asociado a la unidad constructiva, puesto que solo habrá que multiplicar el impacto asociado a cada tonelada de producto, el peso de cada pieza y el número de piezas que componen la unidad constructiva. Además, el hecho de no considerar todas las etapas del ciclo de vida hace que la unidad por revisar sea la unidad declarada y no la unidad funcional.

Con base en estas indicaciones, y considerando que la cuantificación de la huella de carbono debe ser indicada en masa de CO<sub>2</sub> por unidad funcional o declarada, la unidad declarada estará *en función de cada uno de los productos seleccionados y será “tonelada de producto cerámico fabricado”*.

En función de la masa de cada uno de los productos, se puede establecer también como *unidad alternativa la unidad de producto*, únicamente a título informativo o de referencia, puesto que no se especificará la función concreta del producto. Atendiendo a los criterios establecidos en la RCP publicada por TBE para DAP de productos cerámicos, la unidad funcional se define como: *1 tonelada de producto cerámico con una vida útil de servicio esperada de 150 años*.

### **28.3 Límites del sistema**

Los límites del sistema indican los procesos que deben ser incluidos en el estudio. Estos deben ser coherentes con el objetivo del estudio y separar aquellos procesos y etapas del sistema que no corresponden a dicho objeto de análisis.

El presente estudio, considerando que solo se analizan los datos desde la extracción de las materias primas hasta la puesta en obra del producto, es del tipo “cuna a

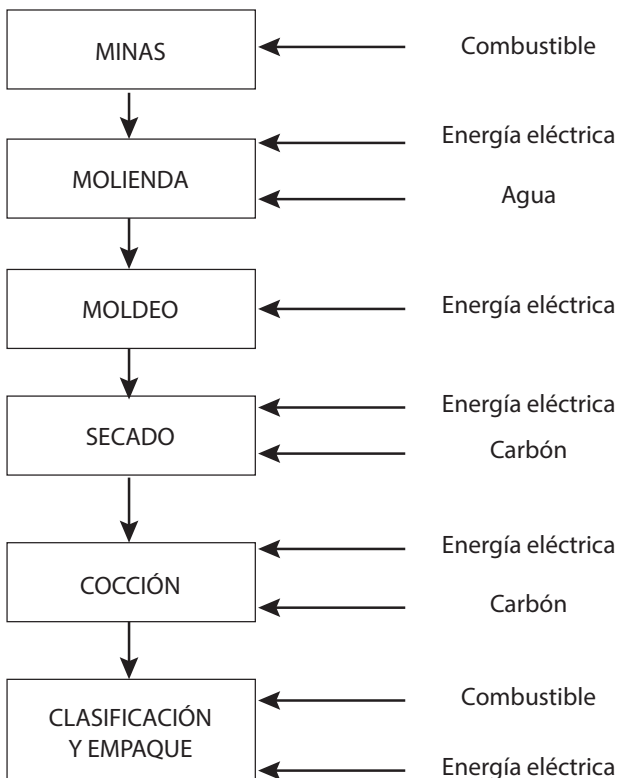
puerta”, de manera que quedan incluidos dentro del sistema todos los módulos de la etapa de producto (A1-materias primas, A2-transporte y A3-fabricación).

### 28.3.1 Módulos incluidos dentro del estudio

De acuerdo con la clasificación y codificación de la norma EN-15804, los procesos del ciclo de vida de los productos cerámicos que se incluyen dentro de los límites del sistema se pueden resumir en los siguientes:

- Extracción de la arcillas. Minas (A1).
- Transporte de materias primas a planta de producción (A2).
- Almacenamiento, carga y molienda (A3a).
- Moldeo (A3b).
- Secado (A3c).
- Cocción (A3d).
- Clasificación y empaque (A3e).

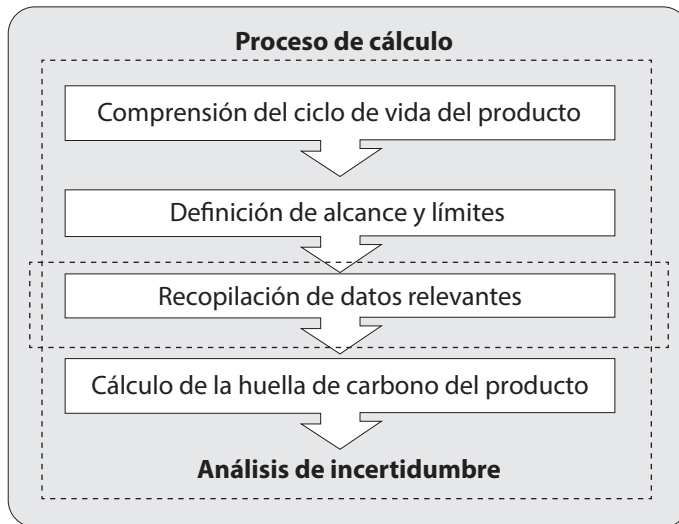
**Figura 18. Esquema de proceso de fabricación y entradas en el sistema**



### 28.3.2 Recogida de datos. Análisis de inventario

El análisis de inventario o recopilación de la información relevante es la fase más importante del todo el proceso de cálculo de la huella de carbono y energía embebida. Los datos que se van a incluir en el inventario deben recopilarse para cada proceso unitario incluido dentro de los límites del sistema.

Figura 19. Etapa de análisis de inventario en el proceso de cálculo (PAS 2050:2011)



El análisis de inventario o la recogida de datos/información se realiza, como se ha comentado, por dos vías distintas:

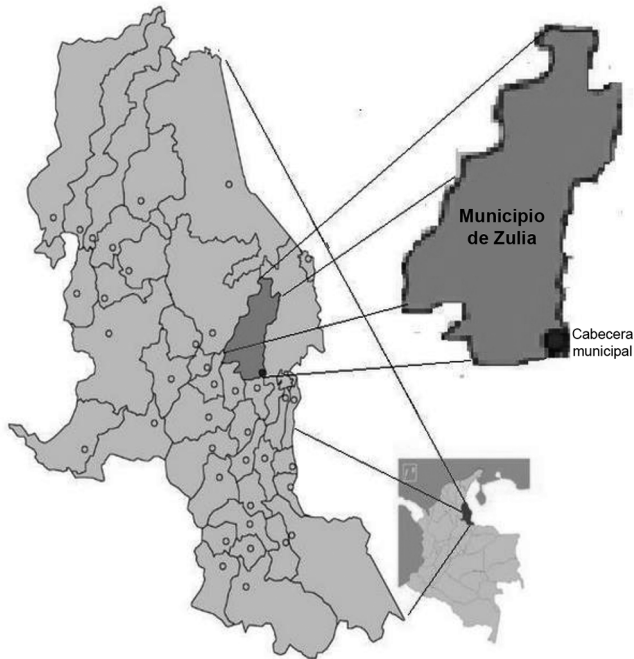
- Recogida de información en fábrica y canteras (ladrillera, mina y central termoeléctrica).
- Recopilación bibliográfica.

### 28.4 Datos de planta de extracción de arcillas

De esta etapa se considera únicamente el impacto asociado al consumo del combustible empleado por la maquinaria (petrodiesel) de extracción. Quedan fuera del estudio el resto de elementos, al interpretar *a priori* que el impacto producido por ellos será mínimo con relación a la carga total del producto estudiado (p.e., aceites de mantenimiento de maquinaria o neumáticos).

En el presente estudio se consideran, para la etapa de extracción de arcillas, las canteras que tiene disponible una empresa cerámica en el municipio de El Zulia, situado en la subregión oriental del departamento Norte de Santander, con una superficie de 449.07 km<sup>2</sup>, equivalente al 0,22% del área total del departamento.



**Figura 20. Localización del área de extracción de arcillas**

Este terreno es apto para la ejecución de las labores de explotación necesarias de la materia prima arcillosa para su posterior beneficio en la planta de procesamiento. El terreno cuenta con una vía de acceso en buen estado, así como con un frente de explotación de 250 m apropiado para la extracción de la arcilla. También se ha adecuado un sitio especial para el depósito de estériles, como el producido en la operación de descapote y preparación del frente de explotación, y también de las capas de arenisca que suprayacen a los mantos arcillosos, cumpliendo de esta manera parte importante de la normatividad ambiental vigente.

Para el caso de la ladrillera se consideran dos tipos de arcillas: arcilla roja y arcilla gris rojiza, cuya mayor diferencia es el porcentaje de arena que presentan.

**Figura 21. Área de extracción de arcillas (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)**



Los datos más relevantes recogidos, relativos a la extracción de arcillas como materia prima para la fabricación de productos cerámicos, son los siguientes:

- Maquinaria de extracción, consumos (petrodiesel) y rendimientos:
  - » Excavadora: 6,6 gal/h y 66 t/h.
  - » Bulldozer: 4,8 gal/h y 66 t/h.
  - » Cargador: 2,04 gal/h y 144 t/h.
  - » Caterpillar: 3,6 gal/h y 36 t/h.

**Figura 22. Carga de arcillas para transporte a planta (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)**



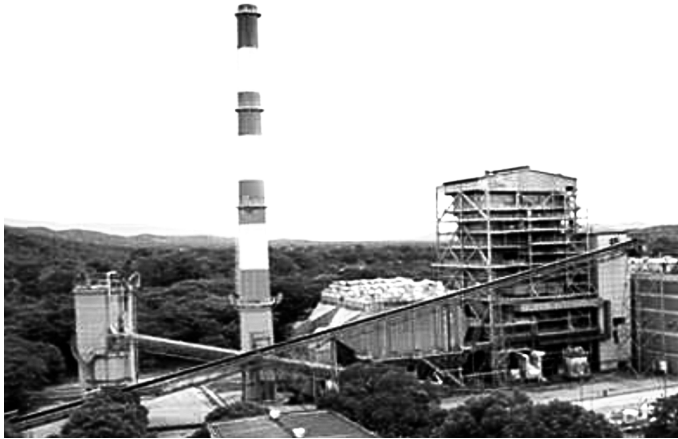
## **28.5 Datos de planta generadora de cenizas volantes**

La central termoeléctrica se ubica en San Cayetano, Norte de Santander. Cuenta con una capacidad de generación de 155 MW y consiste en una unidad turbogeneradora a vapor, compuesta por una turbina de dos cilindros en tándem,

de tres etapas, con doble exhosto al condensador y seis extracciones. Opera con vapor a  $127 \text{ kg/cm}^2$  y  $538 \text{ }^\circ\text{C}$  y tiene un generador de 204.400 kVA, totalmente cerrado, enfriado por hidrógeno y factor de potencia 0,85. Está provista de una caldera colgante, de un tambor, radiante, con recirculación y circulación natural, la cual utiliza carbón pulverizado. Produce 495 t/h de vapor a  $538 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $127 \text{ kg/cm}^2$ . Tiene precipitadores electrostáticos y altura de chimenea de 90 m para protección del medio ambiente.

La unidad tiene un consumo térmico específico garantizado de 2.410 kcal/kWh y una eficiencia neta de 35,7%.

**Figura 23. Vista de la central termoeléctrica (Termotasajero S.A. E.S.P., 2008)**



Para el estudio comparativo de huella de carbono, los datos más relevantes recogidos en esta planta, relativos al nutriente tecnológico para ser utilizado como materia prima en sustitución de la arcilla para la fabricación de productos cerámicos, son los relativos al proceso de carga del producto en camiones para su transporte a la planta de producción cerámica:

- Maquinaria de carga, consumos (petrodiesel) y rendimientos:
  - » Para cargador: 2,04 gal/h (7,72 l/h) y 144 t/h.

## **28.6 Datos de transporte de materias primas a planta de producción**

Al igual que ocurre en el caso de la extracción de materias primas de las canteras, de esta etapa se considera únicamente el impacto asociado al consumo del combustible (considerando petrodiesel). Quedan fuera del estudio el resto de elementos, al interpretar *a priori* que el impacto producido por ellos será mínimo con relación a la carga total del producto estudiado.

Según la información recogida, y para hacer comparaciones tanto para la arcilla recogida en la mina como para las cenizas recogidas en la central termoeléctrica, se considera un camión de transporte tipo volquete (el mismo tanto para el transporte de arcillas como para el transporte de cenizas volantes), con las siguientes características técnicas:

- Volumen de caja: 18,00 m<sup>3</sup>.
- Carga útil máxima: 24,00 t.
- Potencia máxima de motor: 240,00 km/h.
- Velocidad media de desplazamiento: 40 km/h.
- Consumo medio 100 km: 10,30 gal (38,99 l).

**Figura 24. Modelo de volqueta utilizado en el estudio**



Las distancias consideradas desde la zona de extracción de materias primas hasta la planta de producción son las siguientes:

- Distancia mina-ladrillera: 22 km.
- Distancia central termoeléctrica-ladrillera: 18 km.

**Figura 25. Distancia desde la central termoeléctrica a la ladrillera del sector cerámico (ArcGIS webmap)**



Se considera el recorrido ida/vuelta ya que no puede ser aprovechado el recorrido de vuelta por los camiones para carga de otro tipo de producto.

Es importante tener en cuenta que la determinación del consumo medio es de cierta complejidad ya que el consumo de un vehículo depende de su motor y transmisión, carrocería, condiciones de tránsito, la carga que lleve, su aerodinámica, las condiciones de uso y manejo, y otros factores difícilmente cuantificables, variables que influyen en el consumo unitario por unidad declarada.

## 28.7 Datos de planta de producción

La colaboración de la industria cerámica resulta vital para obtener datos reales y de primer orden con los que posteriormente se realizan los cálculos para la obtención de la energía embebida y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al producto cerámico tipo y al innovador con nutrientes tecnológicos.

Para el cálculo, con base en datos reales, se ha tomado como referencia de planta de fabricación una ladrillera del sector cerámico.



**Figura 26. Ubicación de la ladrillera del sector cerámico (ArcGIS webmap)**



La selección se ha realizado intentando que la industria seleccionada sea representativa del sector del Norte de Santander, siguiendo estos criterios:

- Que posea una tecnología de producción acorde con la media nacional, es decir, que el proceso de producción y los equipos utilizados no estén obsoletos ni estén en vanguardia dentro del sector.
- Que se sepa, de antemano, que disponen de datos de consumos, producción, rendimientos de maquinaria, etc.

De este modo se selecciona la ladrillera del sector cerámico y se contacta con sus responsables, con el fin de conseguir la aceptación para colaborar en la realización del estudio y concretar una fecha de visita para realizar la toma de datos necesaria.

La empresa ladrillera del sector cerámico se encuentra ubicada vía a El Zulia en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander. Cuenta con experiencia en la explotación, transformación y comercialización de productos derivados de la arcilla, con estándares de la más alta calidad, en la obtención de productos terminados: tableta, tablonés, guardaescobas, escaleras, entre otros.

Los datos recogidos en esta empresa para el cálculo de la huella de carbono y energía embebida, referentes a la producción, y para cada una de las etapas del proceso, son los siguientes:

- *Almacenamiento, carga y molienda*

Una vez llegan las arcillas a la planta de producción, se realiza un almacenamiento. Para ello se dispone de dos áreas cubiertas por dos estructuras metálicas consecutivas. El material se almacena en forma de montaña o pilas, las cuales están dispuestas de acuerdo al tipo de arcilla: roja y gris rojiza. Otra pila corresponde al material de productos no conformes y recortes. El tiempo mínimo de homogeneización de la arcilla en galpón es de 15 días, para finalmente hacer una mezcla ideal.

Posteriormente se traslada el material por medio del cargador a las respectivas tolvas alimentadoras, donde es suministrado gradualmente a los molinos de martillos, comenzando el proceso de molienda.

Los datos recogidos correspondientes a las palas cargadoras se corresponden con un *consumo de 2,04 gal/h (7,72 l/h) y un rendimiento de 144 t/h.*

**Figura 27. Carga de arcillas en tolva (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)**



En el proceso de molienda se utilizan molinos de martillos y bandas transportadoras. En los molinos de martillos se reduce el tamaño del grano del material, y luego este es desplazado verticalmente por un elevador de cangilones hasta el tamiz de malla 10, donde se clasifica el material de acuerdo al tamaño de la partícula. La energía consumida en esta etapa es de *origen eléctrico (10.800 kW/h), con un rendimiento de 4,13 kWh/t.*

- *Moldeo y extrusión*

La pasta, después del mezclado, pasa al proceso en donde se le aplica la presión de vacío para compactarla. Posteriormente pasa por la boquilla ubicada a la salida de la máquina, lo que da como resultado el embutido en el tamaño deseado. Después se corta y se decora con el diseño solicitado en tabletas, otoño, lisa o rombo, además de tejas, bloques y ladrillos cara vista.

Finalmente, el producto se revisa y se desliza para desfilarlo. El sobrante que se obtiene es enviado nuevamente al proceso para su reutilización. La maquinaria utilizada en esta fase incluye: mezcladoras, laminadores, extrusoras y cortadoras.

*La energía consumida en esta etapa es de origen eléctrico: 6,92 kWh/t.*

- *Secado*

El secadero utilizado es de cámaras. El secado artificial se lleva a cabo en un espacio cerrado, en el cual se inyecta aire caliente extraído del calor resultante

del enfriamiento de los hornos que recircula en el secadero por medio de un ventilador que se encuentra en continuo desplazamiento.

**Figura 28. Entrada de productos en el secadero de cámaras (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)**



La energía consumida en esta etapa es de *origen eléctrico*: 180 kWh/t.

- *Cocción*

En la operación de cocción se utilizan hornos tipo colmena de llama. Se inicia con el cargue del horno, en el cual se coloca el material seco en paquetes con una disposición particular a lo largo de la dimensión máxima de este. Esto se realiza de forma manual y carreta con 14 operarios. El combustible utilizado es carbón térmico, con apoyo de energía eléctrica.

La curva de cocción es de 70 h, con un *consumo de carbón de 15,00 t/quema*. La *capacidad del horno es de 180,00 toneladas de producto cocido por quema*. El *consumo eléctrico es de 10,80 kWh/t*. El *porcentaje de roturas es del 2%*.

**Figura 29. Hornos colmena y carga de carbón en hornos (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)**







- *Clasificación y empaque*

Los productos terminados que se encuentran en el patio se clasifican según su color, que puede ser: rojo, canela, mate y colonial. Luego se realiza una selección del material según las características que presenta tales como: nivel de torcedura, manchas en la superficie de la tableta, desportillado, partiduras o fisuras.

El material de primera se empaca con plástico membreado con el logo de la empresa. El material tipo comercial se empaca en plástico transparente, y el material tipo retal no se empaca. Seguidamente, se almacena para su distribución y comercialización.

La maquinaria utilizada en esta etapa son *túneles termoencogibles de empaqueo*, con un consumo eléctrico de 2,82 kWh/t.

**Figura 30. Empaque de producto acabado (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)**



- *Transporte de producto acabado*

Aunque, como se ha comentado, el estudio comparativo que se realiza es del tipo de cuna a puerta, es decir, no se tiene en cuenta el impacto asociado a las emisiones de transporte del producto acabado, sí que merece la pena, únicamente a título informativo, mencionar el mercado de los productos objeto del estudio. Los productos son vendidos a mercados tanto nacionales como internacionales, con porcentajes de participación de 80 y 20% respectivamente (tabla 40).

**Tabla 40. Mercados a nivel nacional e internacional**

A nivel nacional	Km	A nivel internacional	Km
Cúcuta	14,8	Ecuador	1.802,2
Bogotá	571,3	Venezuela	1.764,4
Cali	966,5	Costa Rica	2.140,2
Medellín	596,9	República Dominicana	1.245,5
Barranquilla	659,3	Puerto Rico	1.328,0
Villavicencio	691,7	-	-
Ipiales	1.433,1	-	-
Sogamoso	396,4	-	-

## 28.8 Datos bibliográficos

Aunque se considera que los datos recogidos son de calidad suficiente para alcanzar los resultados esperados, resulta siempre conveniente disponer de datos de fuentes bibliográficas contrastadas, sobre todo para datos que no pueden ser recabados de manera directa en la encuesta realizada en la planta de producción.

Las principales fuentes bibliográficas de donde se ha extraído información, además de los estudios previos existentes en la materia (indicados en el capítulo de estado del arte), han sido las siguientes:

- Base de datos FECOC (Amell *et al.*, 2016).
- Inventario de gases de efecto invernadero (IPPC, 2006).
- Datos sectoriales de los sectores eléctricos, térmico y de transporte.
- Corinair (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2016).

Además de estas fuentes de datos, se tienen en cuenta también otras bases específicas del sector y los informes estadísticos anuales de las asociaciones sectoriales. Merece especial mención, por la importancia que tiene dentro del objeto del estudio (aparte del térmico), el sector eléctrico.

## 28.9 Los factores de emisión

Con el fin de estimar las emisiones generadas por las diversas fuentes, la metodología IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) sugiere utilizar factores de emisión apropiados para cada caso. Los factores de emisión son herramientas que permiten estimar la cantidad de emisiones de un determinado contaminante, generada por la fuente en estudio. Varían no solamente de acuerdo con el tipo de combustible sino con la actividad en la que se aplique su proceso de combustión (p.e., generación de energía, procesos industriales, aplicaciones residenciales) y la tecnología utilizada para tal fin (p.e., calderas, hornos, estufas). En este sentido, existen factores de emisión por combustible, proceso y tecnología, de tal manera que, en la medida en que se avanza en el grado de detalle, el factor de emisión resulta más exacto.

Generalmente, los factores de emisión se expresan como el peso de contaminante emitido por unidad de peso, volumen, energía o actividad, dependiendo del nivel escogido. Así, un factor de emisión de monóxido de carbono para el gas natural igual a 18 corresponderá a 18 kg de CO generados por TJ (o sus unidades correspondientes) de gas natural alimentado en el proceso de combustión (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2003).

Por lo tanto, para convertir los consumos energéticos obtenidos en el capítulo anterior en emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas, es necesario utilizar factores de emisión y conversión aceptados internacionalmente.

En el marco del proyecto Mecanismo de Mitigación Voluntaria de Gases de Efecto Invernadero Colombia (MVC), adelantado por la Fundación Natura, la Bolsa Mercantil y la Corporación Ambiental Empresarial, con el acompañamiento y coordinación de la UPME y el MADS, se desarrolló una consultoría técnica para la actualización de la base de datos de los factores de emisión de los combustibles colombianos (FECOC) (Carrasco, 2014), factores que son los utilizados para el cálculo de huella de carbono y energía embebida en el marco de la presente tesis.

### 28.9.1 Combustible para elementos de transporte y extracción

Como ha quedado reflejado en los datos recogidos en la encuesta realizada, el combustible utilizado en los elementos de extracción de materias primas y transporte es el petrodiesel: gasóleo extraído del petróleo. Se diferencia del biodiesel, que es el gasóleo extraído del aceite vegetal. En Colombia se lo denomina ACPM, que son las siglas de aceite combustible para motores.

Químicamente, este combustible está constituido por una mezcla de hidrocarburos, la cual se obtiene a través de la destilación del petróleo, realizada de forma fraccionada y a una temperatura que puede variar entre 250°C y 350°C.

Entre otras de sus características, las industrias petroquímicas señalan que el biodiésel o ACPM resulta muchísimo más económico de producir que la gasolina, precisamente porque su proceso de refinamiento suele ser mucho más sencillo. En sintonía con esto, el ACPM contaría con mayores concentraciones de azufre y otros minerales (Minminas, s.f.).

Así mismo, al ser un compuesto mucho menos refinado que la gasolina, el ACPM resulta también mucho más rendidor, es decir que presenta hasta dieciocho por ciento más energía que la gasolina, en cuanto a sus unidades de volumen. De hecho, algunas fuentes han llegado a señalar que, además de rendir mucho más que la gasolina, el diésel constituye un combustible que puede incluso durar hasta el doble que la gasolina (UPME, 2010). En tal sentido, también resulta mucho más eficiente con respecto al rendimiento de la gasolina, por lo que un motor de diésel suele ser mucho más eficiente. De manera que no es de extrañar que desde su invención se haya venido implementando en actividades como la calefacción de hogares, la generación de electricidad, combustible de maquinarias y últimamente de vehículos modernos, que buscan aprovechar lo económico de su producción y el mayor rendimiento de la energía que produce, en comparación con la gasolina.

De acuerdo con la información de FECOC 2016 (Amell *et al.*, 2016), el factor de emisión considerado para el ACPM es  $10,28 \text{ kgCO}_2/\text{galón}$  ( $2,95 \text{ kgCO}_2/t$ ). Para el cálculo de energía embebida, se obtiene un PCI para el ACPM de  $38,16 \text{ kWh/galón}$  ( $11,71 \text{ kWh/kg}$ ).

### 28.9.2 Carbón térmico

El carbón térmico es la fuente energética utilizada en el proceso de cocción para el caso de estudio (ladrillera del sector cerámico). El carbón es el combustible fósil más abundante en la naturaleza, con 860.938 Mt.

En reservas mundiales medidas a finales del 2010, se tiene que las mayores reservas por país se encuentran en Estados Unidos con el 27,6%, Rusia con el 18,2%, China con el 13,3%, con Australia el 8,9% e India con el 7,0%, mientras que Colombia se ubica en el decimoprimer lugar con 6.593,4 millones de toneladas equivalentes al 0,8% (Araújo Ibarra & Asociados S.A., 2006).

Las principales actividades que componen la cadena colombiana del carbón pueden explicarse en las siguientes etapas:

- Exploración-reservas y calidades.
- Desarrollo y montaje, preparación y explotación (producción).
- Clasificación y lavado del carbón.

- » Transformación del carbón, en la producción de coque y otros procesos.
- » Transporte desde la mina hasta el sitio de beneficio y los patios de acopio.
- Comercialización y distribución.

Colombia cuenta con recursos de carbón de excelente calidad. Las reservas medidas son de 6.508 Mt, distribuidas en las tres cordilleras: Oriental, Central y Occidental (Universidad de los Andes, Centro de Estudios de Fronteras e Integración, s.f.):

- La Guajira = 3.694,61 Mt.
- Cesar = 1.563,93 Mt.
- Córdoba = 378,17 Mt.
- Cundinamarca = 221,81 Mt.
- Boyacá = 153,92 Mt.
- Norte de Santander = 105,34 Mt.
- Antioquia = 87,47 Mt.
- Valle del Cauca y Cauca = 40,52 Mt.

Las principales zonas mineras de Norte de Santander están en Catatumbo, con 43,63 Mt; Zulia-Chinácota, con 34,01 Mt; y Tasajero, con 11,46 Mt.

**Figura 31. Carga de carbón (inferior) para transporte a planta (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2003)**



**Las principales características del carbón térmico explotado en la zona son las siguientes:**

- Poder calorífico: 7.000 kg/kg (normas de emisiones, Resolución 989).
- Concentración MP: 250 mg/m<sup>3</sup>.
- Concentración SOx: 550 mg/m<sup>3</sup>.

- Concentración NO<sub>x</sub>: 550 mg/m<sup>3</sup>.
- Concentración de HF: 8 mg/m<sup>3</sup>.
- Concentración de HCl: 40 mg/m<sup>3</sup>.

De acuerdo con la información de FECOC 2016, el factor de emisión considerado para el *carbón térmico de Norte de Santander* es de 2.812,75 kgCO<sub>2</sub>/tonelada (Amell *et al.*, 2016).

### 28.9.3 El sector eléctrico en Colombia. *Mix* eléctrico

El sector eléctrico en Colombia está mayormente dominado por generación de energía hidráulica (66% de la producción) y generación térmica (33%). No obstante, el gran potencial del país en nuevas tecnologías de energía renovable (principalmente eólica, solar y biomasa) apenas si ha sido explorado. Las grandes plantas de energía hidráulica y térmica dominan los planes de expansión actuales.

Una característica interesante del sector eléctrico de Colombia (así como de su sector de abastecimiento de agua) es la existencia de un sistema de subsidios cruzados desde usuarios que viven en áreas consideradas como relativamente afluentes, y de usuarios que consumen cantidades de electricidad superiores a aquellos que viven en áreas consideradas pobres y quienes usan menos electricidad (UPME (2017)).

**Figura 32. Distribución de sistemas de generación de electricidad en Colombia (UPME, 2010)**

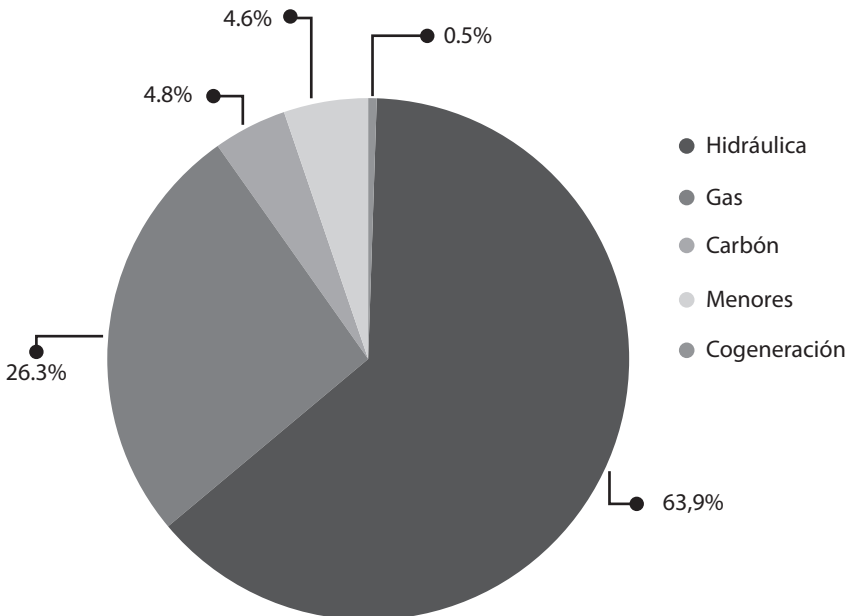
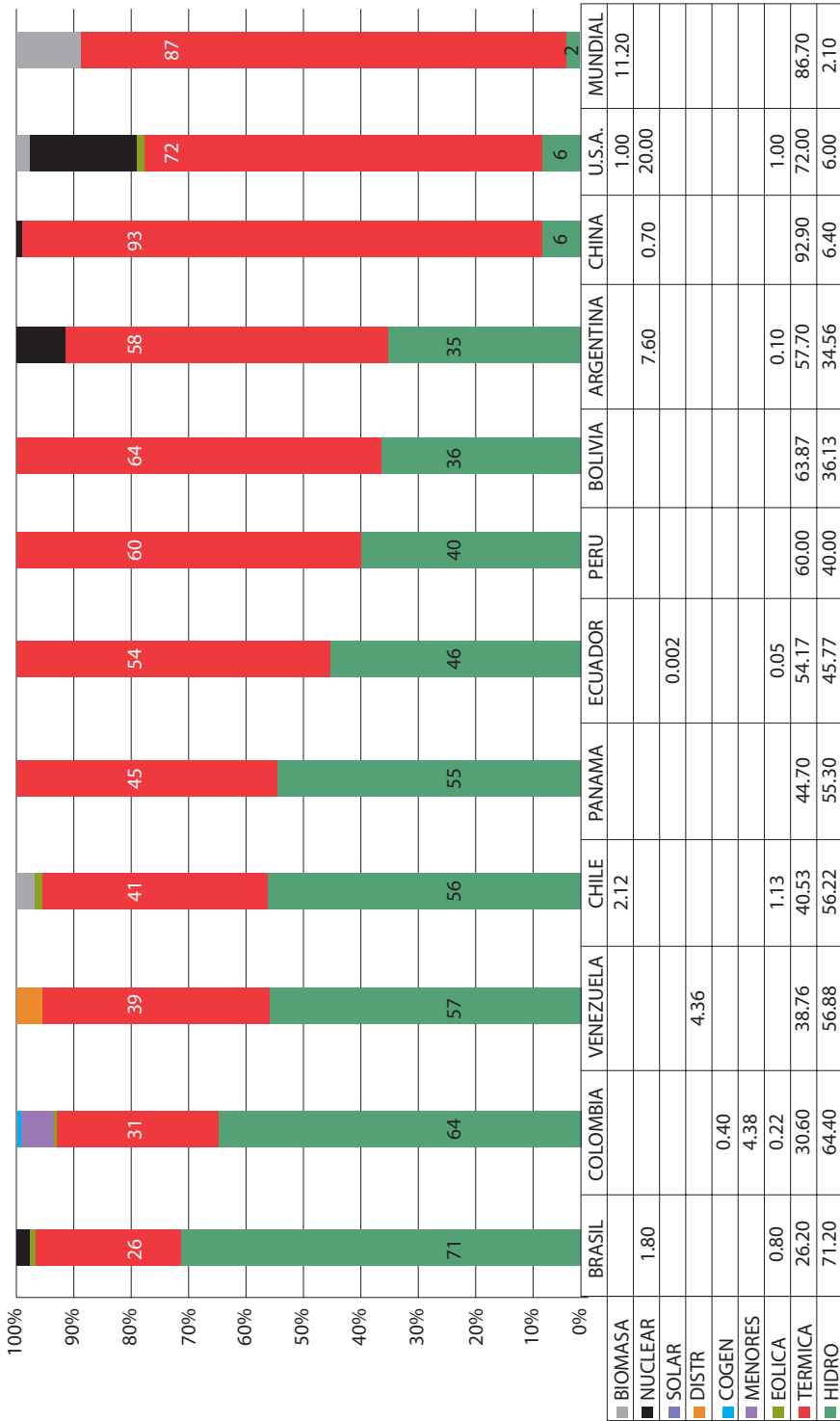


Figura 33. Matriz eléctrica por capacidad instalada (UPME, 2017)



Con base en la matriz o *mix* eléctrico para Colombia, se determinan las emisiones asociadas a cada kWh que se consume en el punto de destino (energía final).

De acuerdo con los datos ofrecidos por la UPME, para el año 2016 el indicador de emisiones de  $CO_{2\text{equiv}}$  por kWh de energía eléctrica consumido se encontraba en 120 gramos de  $CO_2$  por kWh (UPME, 2017). Este valor se encuentra muy por debajo de valores de otros países debido a la procedencia (hidroeléctrica) de las fuentes de generación.

**Tabla 41. Análisis comparativo de emisiones  $CO_2$  en Colombia por generación eléctrica (Sistema de Información Eléctrico Colombiano)**

País	Factor emisión generación [g $CO_2$ /kWh]
China	764
Estados Unidos	542
Bolivia	498
México	467
Chile	375
España	361
Ecuador	354
Argentina	343
Panamá	300
Perú	195
Colombia	<b>120</b>
Brasil	81

## 29. Análisis de los datos obtenidos

Una vez finalizada la fase de inventario, y a partir de la información obtenida en las industrias, completada y contrastada con información de bases de datos y fuentes bibliográficas, se pueden exponer, a modo de resumen, las siguientes conclusiones:

- Los datos recogidos en la mina, la central termoeléctrica y la ladrillera, completados con bases de datos, se consideran suficientes para poder llevar a cabo con garantías las siguientes fases de estudio.
- En lo referente a la subetapa de minas, solo se considera como relevante para el cálculo de la HdC y de la energía embebida del producto el consumo energético (petrodiesel) de la maquinaria de extracción. Este consumo está en función de factores tales como el rendimiento de la maquinaria, la accesibilidad, la



naturaleza del terreno, la climatología, la habilidad del operador, las distancias de trabajo, el estado de conservación de la maquinaria, etc.

- En el caso del transporte a planta de las materias primas, se considera únicamente el impacto asociado al consumo del combustible (petrodiesel), de manera que quedan fuera del estudio el resto de elementos al interpretar, *a priori*, que el impacto producido por ellos será mínimo con relación a la carga total del producto estudiado. La determinación del consumo medio es, a su vez, de cierta complejidad, aunque el factor más importante para tener en cuenta es la distancia de canteras a planta de producción.
- Respecto de la etapa de fabricación, la etapa más crítica, como ya se ha comentado, es la cocción del producto.

Con base en estas conclusiones, se entiende que los datos obtenidos son perfectamente válidos para el estudio comparativo, que se pretende llevar a cabo en este apartado, de cómo afecta a la reducción de la huella de carbono y de energía embebida de producto la introducción de nutrientes tecnológicos, aplicado a la región Norte de Santander.

En este punto resulta muy importante recalcar que no se consideran en el presente estudio otros datos aspectos que tienen su propia importancia medioambiental, dado que el objeto del estudio que se lleva a cabo en este apartado es determinar la mejora medioambiental que se produce, en específico, en el proceso de fabricación de productos cerámicos con la incorporación de nutrientes tecnológicos respecto del proceso de fabricación convencional.

En este sentido, se entiende que aspectos que tienen especial relevancia en el proceso de fabricación de productos cerámicos, medioambientalmente hablando, no se ven alterados al utilizar los nutrientes tecnológicos:

- Reducción de residuos por roturas de cocción.
- Emisiones de transporte de producto acabado a obra.
- Impacto ambiental asociado a la vida útil del producto una vez puesto en el edificio.
- Tratamiento del producto cerámico al final de la vida útil.

### **30.Efectos energéticos asociados al proceso de fabricación**

Para el análisis se han tenido en cuenta dos consideraciones. La primera de ellas es el aporte energético de residuo, en este caso el uso del 10% de ceniza volante en la pasta, y la segunda es la disminución del calor de reacción ocasionada por la disminución de la cantidad de caolinita y de agua físicamente adsorbida/absorbida en la pasta cerámica.

Las condiciones iniciales para el establecimiento de operaciones matemáticas son:

1. Cocción a 900 °C para la producción de cerámicos de construcción tipo bloque de cerramiento.
2. 30.000 bloques cargados a un horno tipo colmena
3. Peso de un bloque cocido (peso aprox.) de 6,0 kg.
4. Combustible usado para el proceso tradicional de cocción de bloque: 15.000 kg de carbón mineral.

### 30.1 Características de materias primas

Acorde con los resultados de caracterización presentados en el apartado anterior, se tiene que el material arcilloso presenta una pérdida de masa hasta 900 °C de 6,3% (ver tabla 11), que está asociada principalmente a agua físicamente adsorbida/absorbida y al proceso de deshidroxilación de la caolinita (ver figura 20). Sobre este tipo de agua, el análisis termogravimétrico permitió establecer que este valor es cercano al 1,5%. La concentración de caolinita en el material, acorde con la tabla 15 es de 14,4%, y la pérdida de masa, acorde con el resultado de TG, es de 4,4%.

En relación con la ceniza volante, la pérdida de calcinación corresponde al 7,4 %. El 99% de las pérdidas se asocia a la oxidación de materia orgánica residual del carbón mineral, acorde con el análisis de TG presentado en la figura 32

- *Calor aportado por la materia orgánica presente en CT10:*

Masa cargada al horno = 191.340,00 kg

Masa de ceniza volante cargada al horno = 19.134,00 kg

Poder calorífico de la ceniza acorde con DSC (figura 32 = 1.784 kJ/kg)

Calor aportado por la ceniza cargada al horno asumiendo combustión total = 34.135,06 kJ

Asumiendo que al estar inmerso en la pasta cerámica solo el 70% del carbono residual presente en la ceniza pueda oxidarse (ver figura 40, asociada a efecto de corazón negro a esta temperatura de cocción) y que el poder calorífico no se ve afectado por reacciones de pirólisis, el calor aportado al sistema sería de 23.894.539,2 kJ.

Carbón mineral equivalente = Calor exotérmico aportado por la ceniza volante/  
Poder calorífico del carbón mineral de la región

Poder calorífico del carbón de la zona = 7.000 kcal/kg (29.330 kJ/kg).

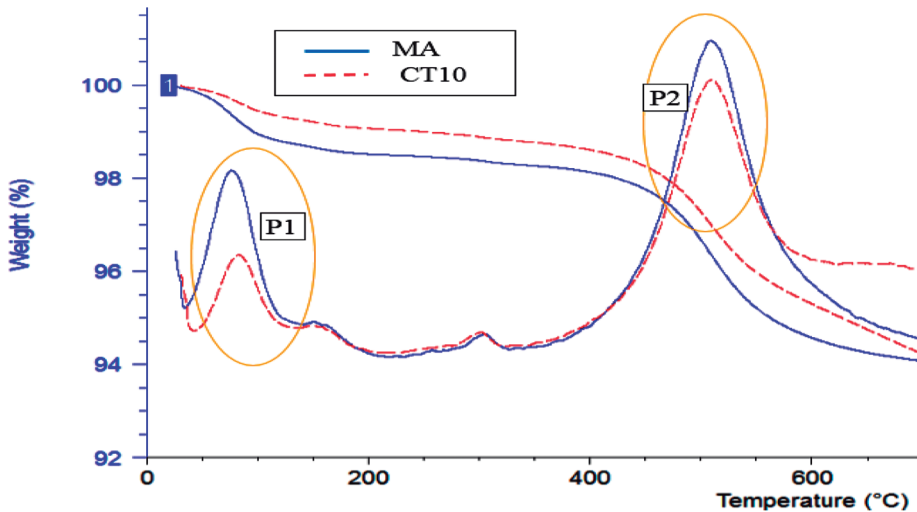
Carbón mineral equivalente = 814,68 kg *carbón de mineral*

- *Ahorro energético por reducción del agua higroscópica y del agua de composición:*

Masa cargada al horno = 191.340,00 kg

Para determinar la masa de agua físicamente adsorbida/absorbida que se reduce por usar 10% ceniza volante en la pasta, se realizó un test de análisis termogravimétrico (ver figura 79) usando la misma masa en el crisol (masa después de proceso de secado). De esta manera se observó que la presencia de ceniza volante contribuye a reducir la cantidad de este tipo de fase en la pasta cerámica.

**Figura 34. Perfil TG de la pasta CT10 (atmósfera de aire)**



El análisis de los perfiles de la figura 79 permite establecer que el agua físicamente adsorbida/absorbida pasó del 1,5% a 0,71%.

El calor requerido para evaporar el agua que se reduce por uso de 10% de CV (joules) es 4.400.982,65 kJ, que ya no es necesario adicionar al sistema cuando se usa la pasta CT10 en vez de MA.

Para la eliminación del agua de composición se realizaron los cálculos con base en la cantidad de caolinita medida por refinamiento Rietveld y el valor de sustitución de la ceniza volante acorde con el siguiente proceso:

Caolinita cargada al horno con solo material arcilloso = 27.139,67 kg *de caolinita*

Calor asociado a deshidroxilación = 949.888,45 kJ

Entonces, el calor total que se reduce por el uso de CT10 en vez de MA es:

Calor total reducido = Calor por agua físicamente adsorbida/absorbida +  
Deshidroxilación caolinita

Calor total reducido = 949.888,45 + 4.400.982,65 kJ

Calor total reducido = 5.350.871,1 kJ

Carbón equivalente = Calor total reducido/Poder calorífico del carbón mineral.

Carbón equivalente = 182,44 kg de carbón de Norte de Santander

Aporte energético del residuo del 10% de ceniza empleado en la pasta = 814,68 kg

Disminución del calor de reacción por la eliminación de la cantidad de caolinita y  
el agua físicamente absorbida en la pasta = 182,44 kg

Total = 997,12 kg de carbón de Norte de Santander

### 30.2 Efecto sobre la energía embebida en el material cerámico

Este valor corresponde a un ahorro de combustible para los empresarios. Al ser llevado al número de operaciones promedio de las empresas de la región (cuatro quemas al mes, usando cuatro hornos colmena en promedio durante doce meses, para un total de 192 quemas/año), daría un ahorro de 191.447,04 kg/año de carbón, es decir, 191,45 t/año que podrían ser usadas para realizar 12,76 operaciones o lotes de cocción en el horno colmena para este tipo de producto. En términos monetarios, sería un valor de COP 37.440.000 por año, que equivale a USD 124.800. Esto corresponde a un ahorro del 7,67% del costo del carbón por año.

## 31. Evaluación de impactos. Proceso convencional

En este capítulo se procede a convertir las entradas obtenidas en el capítulo anterior en cargas ambientales referidas a emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2equiv</sub>). Paralelamente, y para el cálculo de la energía embebida, se suman todas las cargas energéticas (térmica y eléctrica) de cada uno de los diferentes procesos incluidos dentro de los límites del sistema.

Una vez obtenidos los datos relacionados con las distintas materias, actividades y procesos relacionados con el ciclo de vida del producto (dentro de los límites de sistema establecidos), se realizan los balances de masas de cada fase del proceso y se aplican los factores de emisión.

El conjunto de emisiones generadas a lo largo de las etapas consideradas dentro de los límites del sistema dará lugar a las emisiones de CO<sub>2equiv</sub> por unidad declarada

de producto, y así se obtiene la HdC. La misma operación, pero con las cargas energéticas, se sigue para los cálculos de energía embebida.

### 31.1 Clasificación y organización de datos

La HdC total para cada uno de los productos en estudio dentro de la presente tesis, y para los límites de sistema definidos, viene definida por la siguiente fórmula:

$$\text{HdC}(\text{total}) = \text{HdC}(\text{A1}) + \text{HdC}(\text{A2}) + \text{HdC}(\text{A3a}) + \text{HdC}(\text{A3b}) + \text{HdC}(\text{A3c}) + \text{HdC}(\text{A3d}) + \text{HdC}(\text{A3e})$$

Donde:

HdC(total) es la huella de carbono total ( $\text{kgCO}_{2\text{equiv}}/\text{t producto}$ ).

Los sumandos son la HdC de cada una de las etapas:

HdC(A1): Extracción materias primas. Minas.

HdC(A2): Transporte materias primas a planta.

HdC(A3a): Almacenamiento, carga y molienda.

HdC(A3b): Moldeo.

HdC(A3c): Secado.

HdC(A3d): Cocción.

HdC(A3e): Clasificación y empaque.

Del mismo modo, la energía embebida total para cada uno de los productos en estudio, y para los límites de sistema definidos, vendrá definida por la siguiente fórmula:

$$\text{Ee}(\text{total}) = \text{Ee}(\text{A1}) + \text{Ee}(\text{A2}) + \text{Ee}(\text{A3a}) + \text{Ee}(\text{A3b}) + \text{Ee}(\text{A3c}) + \text{Ee}(\text{A3d}) + \text{Ee}(\text{A3e})$$

Donde:

Ee(total) es la energía embebida total de producto ( $\text{kWh}/\text{t producto}$ ).

Los sumandos son la Ee de cada una de las etapas consideradas

Ee(A1): Extracción materias primas. Minas.

Ee(A2): Transporte materias primas a planta.

Ee(A3a): Almacenamiento, carga y molienda.

Ee(A3b): Moldeo.

Ee(A3c): Secado.

Ee(A3d): Cocción.

Ee(A3d): Clasificación y empaque.

A continuación se procede al cálculo de los valores de cada uno de los sumandos de las fórmulas propuestas.

### 31.1.1 Extracción (A1)

El consumo unitario para la etapa de extracción viene dado por la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo unitario (l/t)} = \frac{\text{Consumo maquinaria (l/h)}}{\text{Rendimiento (t/h)}}$$

A partir de los consumos de las maquinarias de extracción y los rendimientos de estas, obtenidos en la fase de inventario:

- Excavadora: 0,1000 gal/ton (0,3785 l/t).
- Bulldozer: 0,0727 gal/ton (0,2752 l/t).
- Cargador: 0,0142 gal/ton (0,0536 l/t).
- Volqueta: 0,1000 gal ton (0,3785 l/t).

Se obtiene un consumo unitario total de 0,29 gal/t (1,09 l/t) de arcilla extraída:

HdC A1 = Consumo unitario \* Factor emisión

$$\text{HdC A1} = 2,95 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/\text{t}$$

Referido a *tonelada de arcilla (materia prima) extraída*.

Para el caso de la Ee, se aplica la siguiente fórmula:

Ee A1 = Consumo unitario \* Factor conversión

$$\text{Ee A1} = 1,09 * 10,07 = 10,93 \text{ kWh/t}$$

### 31.1.2 Transporte a planta (A2)

Al igual que ocurre en el caso de la extracción de materias primas de las canteras, de esta etapa se considera únicamente el impacto asociado al consumo del combustible.

El consumo unitario viene dado por la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo unitario (l/t)} = \frac{C_v}{C_t} * D * 2$$

Donde:

Cv: Consumo vehículo transporte (l/km).

Ct: Carga vehículo transporte (t).

D: Distancia recorrida desde la cantera a la planta.

2: Factor fijo (al considerar el recorrido de ida y de vuelta).

Para el cálculo preciso para cada caso concreto, habría que considerar las tres variables indicadas. Por tanto:

$HdC A2 = \text{Consumo (l/ton} \times \text{km)} \times (\text{Distancia (km)} \times 2) \times \text{Factor emisión (kg CO}_{2\text{equiv}}/\text{l})$

$$HdC A2 = 1,94 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$$

Referido a *tonelada de arcilla (materia prima) transportada*.

Para el caso de la energía embebida, se aplica la siguiente fórmula:

$Ee A2 = \text{Consumo (gal/ton} \times \text{km)} \times (\text{Distancia (km)} \times 2) \times \text{Factor conversión (kWh/gal)}$

$$Ee A2 = 7,20 \text{ kWh/t}$$

### 31.1.3 Fabricación de productos (A3)

Se desglosa, al igual que en la fase de inventario, el cálculo de la HdC y Ee para cada una de las subetapas de la etapa de fabricación de productos.

#### ➤ Almacenamiento, carga y molienda (A3a)

Se incluye el impacto asociado a los consumos de los equipos y maquinaria utilizados desde que depositan las arcillas a pie de planta hasta que el producto pasa a la fase de moldeo.

A partir de la información reflejada en el capítulo de inventario, y de las conclusiones que figuran en este capítulo, la huella de carbono tendrá, por un lado, un valor asociado al consumo eléctrico de la maquinaria y, por otro, el valor del consumo del combustible de la pala cargadora. Con base en estas consideraciones se despeja la siguiente fórmula para el cálculo de HdC:

$$HdC A3a = (Ce \times Fee) + (Cc \times Fec)$$

Donde:

Ce: Consumo eléctrico unitario.

Fee: Factor emisión electricidad ( $\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ ).

Cc: Consumo unitario combustible.

Fec: Factor emisión combustible.

$$\text{HdC A3a} = 0,64 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$$

De la misma forma, se despeja la siguiente fórmula para el cálculo de Ee:

$$\text{Ee A3a} = (\text{Ce}) + (\text{Cc} * \text{Fc})$$

Donde:

Ce: Consumo eléctrico unitario.

Cc: Consumo unitario combustible.

Fc: Factor conversión.

$$\text{Ee A3a} = 4,67 \text{ kWh/t}$$

Los resultados obtenidos, tanto de huella de carbono como de energía embebida, están referidos a *tonelada de arcilla cargada en tolva*.

### ► **Moldeo (A3b)**

Se incluye el impacto asociado a los consumos de los equipos y maquinaria utilizados desde que depositan hasta que el producto queda moldeado y listo para pasar a la fase de secado.

A partir de la información reflejada en el capítulo de inventario, y de las conclusiones que figuran en este capítulo, la huella de carbono tendrá un valor asociado únicamente al consumo eléctrico de la maquinaria. Con base en estas consideraciones se despeja la siguiente fórmula para el cálculo de HdC:

$$\text{HdC A3b} = (\text{Ce} * \text{Fee})$$

Donde:

Ce: Consumo eléctrico unitario.

Fee: Factor emisión electricidad ( $\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ ).

$$\text{HdC A3b} = 0,83 \text{ CO}_{2\text{equiv}}/t$$

La energía embebida de esta etapa será  $6,92 \text{ kWh/t}$ .

Los resultados obtenidos, tanto de huella de carbono como de energía embebida, están referidos a *tonelada de producto para su carga en secadero*.



### ➤ **Secado (A3c)**

Se incluye el impacto asociado al consumo del secadero. A partir de la información reflejada en el capítulo de inventario, la huella de carbono tendrá un valor asociado únicamente al consumo eléctrico del secadero. Con base en estas consideraciones, se despeja la siguiente fórmula para el cálculo de HdC:

$$\text{HdC A3b} = (\text{Ce} * \text{Fee})$$

Donde:

Ce: Consumo eléctrico unitario.

Fee: Factor emisión electricidad ( $\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ ).

$$\text{HdC A3c} = 21,60 \text{ kgCO}_{2\text{equiv}}/t$$

La energía embebida de esta etapa será *180,00 kWh/t*.

Los resultados se refieren a *tonelada de producto seco*.

### ➤ **Cocción (A3d)**

Al igual que en el caso del secado, en la etapa de cocción existe también un importante número de factores que influyen de manera más o menos determinante en el valor total del consumo energético unitario (tipología de horno, pérdidas, temperatura y ciclo de cocción, contenido en carbonatos, tecnología, etc.), lo que supone una dificultad para establecer un valor fijo, tanto para la HdC como para Ee.

En el caso del cálculo de la HdC, en la etapa de cocción, se despeja la siguiente fórmula:

$$\text{HdC A3d} = (\text{Ct} * \text{fc}) + (\text{Ce} * \text{fe})$$

Donde:

Ct: Consumo unitario térmico ( $\text{kg carbón/tonelada producto}$ ).

fc: factor de emisión del combustible.

Ce: Consumo unitario eléctrico.

fe: Factor de emisión eléctrico.

$$\text{HdC A3d} = 235,63 \text{ kgCO}_{2\text{equiv}}/t$$

Los resultados se refieren a *tonelada de producto cocido*.

En cuanto a la Ee, se calcula según la siguiente fórmula:

$$\text{Ee A3d} = (\text{Cc} * \text{fc}) + \text{Ce}$$

Donde:

Cc: Consumo unitario térmico (kWh/t).

Fc: Factor de conversión.

Ce: Consumo unitario eléctrico (kWh/t).

Con estos datos, se obtienen los siguientes valores de Ee:

$$Ee A3d = 689,74 \text{ kWh/t}$$

Los resultados obtenidos están referidos a *tonelada de producto cocido*.

### ► Clasificación y empaque (A3e)

La HdC de este módulo tendrá un valor asociado al consumo eléctrico de la maquinaria. A partir de estas consideraciones se despeja la siguiente fórmula para el cálculo de la HdC:

$$HdC A3e = (Ce * Fee)$$

Donde:

Ce: Consumo eléctrico unitario.

Fee: Factor emisión electricidad (kgCO<sub>2</sub>/kWh).

$$HdC A3e = 0,23 \text{ kgCO}_{2\text{equiv}}/t$$

La energía embebida de esta etapa será *1,92 kWh/t*.

Los resultados se refieren a *tonelada de producto acabado*.

## 31.2 Resultados globales

Con los valores obtenidos de HdC y Ee, para cada una de las etapas consideradas dentro de los límites del sistema en estudio, se obtienen los valores medios globales reflejados en la tabla 42.

**Tabla 42. Valores de HdC y Ee (módulos A1, A2 y A3)**

HdC (kg CO <sub>2equiv</sub> /t)							
HdC A1	HdC A2	HdC A3					TOTAL
		HdC A3a	HdC A3b	HdC A3c	HdC A3d	HdC A3e	
2,95	1,94	0,64	0,83	21,60	235,63	0,23	<b>238,82</b>

Ee (kWh/t)							
Ee A1	Ee A2	Ee A3					TOTAL
		Ee A3a	Ee A3b	Ee A3c	Ee A3d	Ee A3e	
10,93	7,20	4,67	6,92	180,00	689,74	1,92	<b>901,38</b>

### 31.3 Asignación a unidad declarada

Para obtener el valor global, es necesario que cada uno de los valores, tanto de huella de carbono como de energía embebida, esté referido a la unidad declarada definida en el presente estudio, de *tonelada de producto acabado*.

Sin embargo, los valores obtenidos para cada una de las fases incluidas dentro de los límites del sistema están referidos a una unidad distinta, como se indica a continuación:

- A1 (extracción materias primas): tonelada de arcilla extraída.
- A2 (transporte de materias primas a planta): tonelada de arcilla transportada.
- A3a (almacenamiento, carga y molienda): tonelada de arcilla preparada.
- A3b (moldeo): tonelada de producto listo para entrada en secadero.
- A3c (secado): tonelada de producto en seco.
- A3d (cocción): tonelada de producto cocido.
- A3e (empaque): tonelada de producto acabado apilado en patio.

Por lo tanto, se debe hallar la equivalencia entre la unidad declarada y las unidades a las que están referidos los valores de cada una de las fases estudiadas. Se explica tal y como sigue a continuación:

- Arcilla extraída, transportada, molida (A1, A2, A3a).
- Arcilla molida + % agua añadida en amasado = Producto para entrada en secadero (A3b).
- Producto de entrada en secadero – % agua perdida en proceso de secado = Producto seco (A3c).
- Producto seco – % pérdida de peso en cocción = Producto cocido (A3d).
- Producto cocido – % roturas = Producto acabado (A3e).

Así, para un producto tipo, con un 13% de agua añadido en el amasado, un 19% de pérdida de humedad en secado, un 6,3% de pérdida de peso, un 2% de roturas, los valores de HdC y Ee corregidos y referidos a la unidad declarada serán los siguientes (por 1.000 kg de arcilla extraída y transportada):

- Producto en verde = 1.130,00 kg.
- Producto seco = 915,30 kg.
- Producto cocido = 857,64 kg.
- Producto terminado empacado = 840,48 kg.

A modo de ejemplo, para obtener el valor global, referido a la unidad funcional, se deberá aplicar un coeficiente corrector a cada uno de los valores obtenidos, conforme a la siguiente regla:

- $HdC A3d^1 = HdCA3d + \% \text{ roturas}$
- $HdC A3c^1 = HdC A3c (\text{producto seco}) + \% \text{ pérdida de peso en cocción} + \% \text{ roturas}$
- $HdC A3b^1 = HdC A3b (\text{producto en verde}) + \% \text{ pérdida de humedad en secado} + \% \text{ pérdida de peso en cocción} + \% \text{ roturas}$
- $HdC A2^1 = HdC A2 - \% \text{ agua amasado} + \% \text{ pérdida de humedad en secado} + \% \text{ pérdida de peso en cocción} + \% \text{ roturas}$
- $HdC A1^1 = HdC A1 - \% \text{ agua amasado} + \% \text{ pérdida de humedad en secado} + \% \text{ pérdida de peso en cocción} + \% \text{ roturas}$

De este modo se obtienen los valores revisados y referidos a la unidad declarada (tabla 43).

**Tabla 43. Valores de HdC y Ee asignados a unidad declarada (módulos A1, A2 y A3)**

HdC (kg CO <sub>2</sub> equiv./t)							
HdC A1	HdC A2	HdC A3					TOTAL
		HdC A3a	HdC A3b	HdC A3c	HdC A3d	HdC A3e	
4,62	2,85	0,76	1,1280	23,52	240,44	0,234	<b>273,54</b>
Ee (kWh/t)							
Ee A1	Ee A2	Ee A3					TOTAL
		Ee A3a	Ee A3b	Ee A3c	Ee A3d	Ee A3e	
17,14	10,57	5,56	9,30	196,02	703,81	1,92	<b>944,33</b>

## 32. Evaluación de impactos. Proceso innovador

En este numeral se procede a repetir los mismos pasos dados en el numeral anterior para el cálculo de la HdC y Ee del proceso convencional, pero en esta ocasión con los datos que se obtendrían en el proceso innovador, resultado de la aplicación del nutriente tecnológico (10% de cenizas volantes en peso) en la fabricación del producto cerámico.

## 32.1 Clasificación y ordenación

Los procesos que se modifican respecto del proceso convencional son los siguientes:

### 32.1.1 Extracción (A1)

El proceso de extracción de materias primas queda modificado en tanto que se sustituye un 10% de la materia prima convencional (arcillas) por cenizas volantes procedentes de la central termoeléctrica.

En este sentido, la HdC de este proceso será el resultado de sumar la HdC de extracción de las arcillas y la HdC del proceso de la carga de cenizas volantes en camiones para su transporte a la planta de producción de la ladrillera, en relación 90%/10%.

De los cálculos del proceso convencional se obtiene que la HdC para extracción de arcillas es  $2,95 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$ .

Para el caso de la carga de cenizas volantes en camiones en la planta de Termostasajero, los datos son los correspondientes a la pala cargadora (7,72 l/h y 144 t/h). Con estos se obtiene una HdC de  $0,15 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$ , referida a *tonelada de ceniza volante cargada en camión*.

Para el caso de la Ee, el proceso de extracción convencional arroja un resultado de  $10,93 \text{ kWh}/t$ , mientras que la carga de cenizas volantes tiene asociada una Ee de  $0,54 \text{ kWh}/t$ .

Con estos datos se obtiene la HdC para el proceso innovador:

$$\text{HdC A1} = \text{HdC extracción arcillas} * 0,9 + (\text{HdC carga cenizas}) * 0,1 = 2,67 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t.$$

Aplicando la misma fórmula para el cálculo de la Ee, se obtiene un valor de  $9,89 \text{ kWh}/t$ .

### 32.1.2 Transporte a planta (A2)

Al igual que ocurre en el caso de la extracción de materias primas de las canteras, de esta etapa se considera únicamente el impacto asociado al consumo del combustible.

El consumo unitario viene dado por la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo unitario (l/t)} = \frac{C_v}{C_t} * D * 2$$

Donde:

Cv: Consumo vehículo transporte (l/km).

Ct: Carga vehículo transporte (t).

D: Distancia recorrida desde la cantera a la planta.

2: Factor fijo (al considerar el recorrido de ida y de vuelta).

Para el caso del proceso convencional, el valor obtenido es de  $1,9406 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$ .

Para el caso del transporte de cenizas volantes, la distancia es 18 km; por tanto:

HdC A2 = consumo (l/ton \* km) \* (distancia (km) \* 2) \* factor emisión

$$\text{HdC A2} = 0,56 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$$

Con estos datos se obtiene la HdC para el proceso innovador:

$$\text{HdC A1} = \text{HdC extracción arcillas} * 0,9 + (\text{HdC carga cenizas}) * 0,1 = 1,91 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$$

Aplicando la misma fórmula para el cálculo de la Ee, se obtiene un valor de  $7,07 \text{ kWh/t}$ , referido a *tonelada de ceniza (materia prima) transportada*.

### **32.1.3 Fabricación de productos (A3)**

Se desglosa, al igual que en la fase de inventario, el cálculo de la HdC y Ee para cada una de las subetapas de la etapa de fabricación de productos.

#### **► Almacenamiento, carga y molienda (A3a)**

Este proceso no sufre alteración en lo que respecta a HdC y Ee, por lo que los valores obtenidos son los mismos que en el proceso convencional:

$$\text{HdC A3a} = 0,64 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$$

$$\text{Ee A3a} = 4,67 \text{ kWh/t}$$

Los resultados obtenidos, tanto de huella de carbono como de energía embebida, están referidos a *tonelada de materia cargada en tolva*.

#### **► Moldeo (A3b)**

Este proceso no sufre alteración en lo que respecta a HdC y Ee, por lo que los valores obtenidos son los mismos que en el proceso convencional:

$$\text{HdC A3b} = 0,83 \text{ CO}_{2\text{equiv}}/t$$

La energía embebida de esta etapa será  $6,92 \text{ kWh/t}$ .

Los resultados obtenidos, tanto de huella de carbono como de energía embebida, están referidos a *tonelada de producto para su carga en secadero*.

### ➤ **Secado (A3c)**

Este proceso tampoco sufre alteración significativa, por lo que los valores que se obtienen son los mismos que los referidos al proceso convencional:

$$\text{HdC A3c} = 21,60 \text{ kgCO}_{2\text{equiv}}/t$$

La energía embebida de esta etapa será  $180,00 \text{ kWh/t}$ .

Los resultados se refieren a *tonelada de producto seco*.

### ➤ **Cocción (A3d)**

En el caso de la cocción, los resultados que se han obtenido en el estudio de consumo energético de la mezcla de 90% de arcilla y 10% de ceniza volante son los siguientes:

- Cantidad de carbón necesario por quema: 14.002,80 kg.
- Ahorro de carbón respecto de proceso convencional: 997,20 kg.
- Ahorro energético: 6,65%
- Consumo eléctrico: 10,80 kWh/t.

La HdC, en la etapa de cocción, se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\text{HdC A3d} = (\text{Ct} * \text{fc}) + (\text{Ce} * \text{fe})$$

Donde:

Ct: Consumo unitario térmico (kg carbón/tonelada producto).

fc: Factor de emisión del combustible.

Ce: Consumo unitario eléctrico.

fe: Factor de emisión eléctrico.

$$\text{HdC A3d} = (77,79 * 2,81) + (10,80 * 0,12) = 220,05 \text{ kgCO}_{2\text{equiv}}/t$$

Los resultados se refieren a *tonelada de producto cocido*.

En cuanto a la Ee, se calcula según la siguiente fórmula:

$$Ee A3d = (Cc * fc) + Ce$$

Donde:

Cc: Consumo unitario térmico (kWh/t).

Fc: Factor de conversión.

Ce: Consumo unitario eléctrico (kWh/t).

Con estos datos, se obtienen los siguientes valores de Ee:

$$Ee A3d = (77,79 * 8,14) + 10,80 = 644,60 kWh/t$$

Los resultados obtenidos están referidos a *tonelada de producto cocido*.

### ► Clasificación y empaque (A3e)

Este proceso tampoco sufre alteración a nivel de huella de carbono y energía embebida, por lo que los resultados son los mismos que para el proceso convencional y se refieren a *tonelada de producto acabado*.

$$HdC A3e = (1,92 * 0,120) = 0,23 kgCO_{2equiv}/t$$

La energía embebida de esta etapa será *1,92 kWh/t*.

## 32.2 Resultados globales

Con los valores obtenidos de HdC y Ee, para cada una de las etapas consideradas dentro de los límites del sistema en estudio, se obtienen los valores medios globales para el proceso de fabricación innovador (tabla 44).

**Tabla 44. Valores de HdC y Ee del proceso de fabricación innovador (módulos A1, A2 y A3)**

HdC (kg CO <sub>2equiv</sub> /t) proceso innovador							
HdC A1	HdC A2	HdC A3					TOTAL
		HdC A3a	HdC A3b	HdC A3c	HdC A3d	HdC A3e	
2,67	1,91	0,64	0,83	21,60	220,05	0,23	<b>247,93</b>
Ee (kWh/t) proceso innovador							
Ee A1	Ee A2	Ee A3					TOTAL
		Ee A3a	Ee A3b	Ee A3c	Ee A3d	Ee A3e	
9,89	7,07	4,67	6,92	180,00	644,60	1,9200	<b>855,07</b>



### 32.3 Asignación a unidad declarada

En el caso del proceso innovador, los datos necesarios para referir a cada una de las etapas a la unidad declarada son un 13% de agua añadido en el amasado, un 17% de pérdida de humedad en secado, un 6,3% de pérdida de peso y un 2% de roturas. Así, los valores de HdC y Ee serán los que se presentan en la tabla 45.

**Tabla 45. Valores de HdC y Ee asignados a unidad declarada (módulos A1, A2 y A3)**

HdC (kg CO <sub>2equiv</sub> /t) proceso innovador							
HdC A1	HdC A2	HdC A3					TOTAL
		HdC A3a	HdC A3b	HdC A3c	HdC A3d	HdC A3e	
4,18	2,80	0,76	1,12	25,52	224,54	0,23	<b>257,16</b>
Ee (kWh/t) proceso innovador							
Ee A1	Ee A2	Ee A3					TOTAL
		Ee A3a	Ee A3b	Ee A3c	Ee A3d	Ee A3e	
15,51	10,38	5,56	9,30	196,02	657,76	1,92	<b>896,45</b>

### 32.4 Consideraciones finales

Con los valores obtenidos de HdC y de Ee para cada una de las etapas consideradas dentro de los límites del sistema en estudio, y revisados para que el resultado de cada uno de los módulos quede referido a la unidad declarada, se obtienen los valores medios globales, para cada uno de los productos estudiados en esta investigación, que se muestran en la tabla 45 siempre considerando los valores estimados de agua añadida en amasado, pérdida de humedad en secado, pérdida de peso en cocción y de roturas indicados anteriormente.

### 32.5 Análisis comparativo

Una vez obtenidos los datos correspondientes de la HdC y de Ee tanto del proceso convencional de fabricación de productos cerámicos, aplicado al caso de estudio de la ladrillera, como de los datos que se obtendrían como resultado de sustituir un 10% de arcillas de la materia prima por cenizas volantes procedentes de la central de termoeléctrica, se procede a realizar un análisis comparativo de dichos resultados.

Tabla 46. Comparativa de valores de HdC y Ee obtenidos

	HdC (kg CO <sub>2equiv</sub> /t)							TOTAL
	HdC A1	HdC A2	HdC A3				TOTAL	
			HdC A3a	HdC A3b	HdC A3c	HdC A3d		
Proceso convencional (110% arcillas)	4,62	2,85	0,76	1,1280	23,52	240,44	0,23	<b>273,54</b>
Proceso innovador (10% cenizas)	4,18	2,80	0,76	1,12	25,52	224,54	0,23	<b>257,16</b>
Ee (kWh/t)								
	Ee A1	Ee A2	Ee A3				TOTAL	
			Ee A3a	Ee A3b	Ee A3c	Ee A3d		Ee A3e
Proceso convencional (110% arcillas)	17,14	10,57	5,56	9,30	196,02	703,81	1,92	<b>944,33</b>
Proceso innovador (10% cenizas)	15,51	10,38	5,56	9,30	196,02	657,76	1,92	<b>896,45</b>

Las consecuencias medioambientales de la adición de un 10% de cenizas volantes como materia prima en el proceso de fabricación de productos cerámicos son claramente positivas. Así, la huella de carbono se ve reducida en 16,39 kg CO<sub>2equiv</sub>/t producto acabado, lo que supone un descenso de un 5,99% de la huella de carbono respecto del proceso convencional. La energía embebida se ve reducida igualmente en 47,88 kWh/t de producto acabado.

La etapa de cocción de producto es la que representa un mayor descenso de huella de carbono y energía embebida. Otras etapas no sufren alteración en cuanto a valores, mientras que otras (como el secado) tienen un mayor impacto ambiental. Esto es debido a las pérdidas de masa en cocción de la mezcla con cenizas respecto de la convencional, que tienen su repercusión en las etapas “aguas arriba”, aunque el resultado global es claramente favorecedor para el proceso innovador.

Esta reducción se produce sin necesidad de modificaciones en el proceso de producción respecto del proceso convencional, por lo que se obtiene una ventaja medioambiental a un coste económico nulo. Al contrario, el uso de cenizas

volantes reduce el coste económico asociado a la adquisición de materias primas y transporte de estas hasta la planta de producción.

Para el caso de la producción de la ladrillera, la reducción anual de emisiones asociadas al proceso productivo sería de 70,79 toneladas de CO<sub>2</sub>/año.

La viabilidad medioambiental del uso de cenizas volantes en la fabricación de productos cerámicos queda demostrada a partir del análisis de huella de carbono y energía embebida llevado a cabo.

Es importante destacar en este punto que otros aspectos de interés medioambiental, y positivos para la economía circular no han sido analizados de manera comparativa al ser claramente favorecedor el uso de cenizas volantes. Aspectos como el tratamiento de residuos, la extracción de recursos naturales, el consumo de recursos energéticos, etc., son parámetros que se ven favorecidos con el uso de cenizas volantes en el proceso de fabricación de productos cerámicos.

## CAPÍTULO VIII

# EFFECTO ECONÓMICO DEL USO DE NUTRIENTES TECNOLÓGICOS

Teniendo como referencia el libro de Clúster de la Cerámica del área metropolitana de Cúcuta, se presentan las tablas 46 y 47, referente a la capacidad instalada en toneladas/mes y consumo de carbón (toneladas/mes) y número de empresas.

**Tabla 47. Ubicación de las empresas cerámicas del área metropolitana de Cúcuta**

<b>Municipio</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje</b>
Cúcuta	11	18,64
El Zulia	23	39,00
Villa de Rosario	12	20,33
Los Patios	7	11,86
San Cayetano	6	10,17
<b>TOTAL</b>	<b>59</b>	<b>100,00</b>

La cantidad de producto terminado en toneladas por mes y el consumo de carbón en toneladas por mes se evidencian en la tabla 48.

**Tabla 48. Producto terminado (t/mes) y consumo de carbón (t/mes)**

% de empresas	Producto (t/mes)	Consumo de carbón por empresa (t/mes)
28,00	1.000	140
16,00	5.000	700
8,00	2.000	280
7,00	250	35

La cantidad total de productos del área metropolitana de Cúcuta en toneladas al mes y el consumo total de carbón en toneladas por mes se evidencian en la tabla 49.

**Tabla 49. Productos fabricados (t/mes) y consumo de carbón (t/mes)**

% de empresas	Producto (t/mes)	Carbón (t/mes)
28	28.000	3.920
16	80.000	11.200
8	16.000	2.240
7	1.750	245
Total 59	125.750	17.605

## 33. Huella de carbono

### 33.1 Ejemplo con una empresa de la región

Para el caso de una empresa de la región en particular, la reducción anual de emisiones asociadas al proceso productivo sería de 70,79 toneladas de CO<sub>2</sub>/mes. La huella de carbono se ve reducida en:

$$\frac{16 \text{ Kg CO}_2 \text{ Equivalente}}{\text{t de producto}} \times \frac{4320 \text{ t de producto}}{\text{mes}} = 70804,8 \text{ Kg de CO}_2 \text{ Equivalente} \\ = 70,80 \text{ t de CO}_2 \text{ equivalente}$$

Los resultados del estudio demuestran una disminución de la huella de carbono de 16,39 kg CO<sub>2</sub> por toneladas de producto terminado. Teniendo en cuenta la producción mensual del área metropolitana de Cúcuta de 125.750 toneladas de producto por mes, esto representa un ahorro de emisiones de 2.061,04 toneladas de CO<sub>2</sub> (24.732,48 toneladas al año). Este ahorro es equivalente a las emisiones

anuales de 2.248,41 hogares de tamaño medio que emiten 11 toneladas de CO<sub>2</sub> (Agencia Europea del Medioambiente), lo que puede dar una idea cercana del beneficio ambiental que supone el nuevo proceso innovador.

### 33.2 Aporte de inquemados

El porcentaje de residuos de inquemados en un horno colmena corresponde al 28% del carbón usado. Es decir, de las 15 toneladas usadas en una quema se obtienen 4,2 toneladas de residuo.

De las 4,2 toneladas, el 54% es fase orgánica que aún tiene poder calorífico (el poder calorífico del carbón está entre 7.000 y 7.500 kcal/kg). Se concluye entonces que 2,27 toneladas de material ( $4,2 * 0,54$  kcal/kg) aún son útiles (ricas en carbono fijo), y quedan 1,93 toneladas, que corresponden a cenizas. Es decir, de una tonelada de carbón quedan 280 kg de residuo y 151,2 kg útiles. Así, si en el área metropolitana de Cúcuta se consumen 17.605 toneladas de carbón, quedarían útiles 17.605 toneladas de carbón \* 0,1512 t de inquemados útiles = 2.661,88 t/mes. De esas 2.661,88 toneladas que implica poner a punto el horno colmena, el 54% del precio de la tonelada de carbón sería COP 160.000/t \* 0,54 = COP 86.400 = USD 31,71 = EUR 25,49<sup>1</sup>.

En definitiva, se podrían ahorrar 2.661,88 toneladas \* COP 86.400/t = COP 229.986.432/mes = USD 84.415,11 = EUR 67.862,62.

### 33.3 Efectos energéticos asociados al proceso de fabricación

Ahorro total = 997,12 kg de carbón/quema

Quema = 15 t

Ahorro por toneladas = 66,48 kg de carbón

En la ladrillera = 700 t/mes

Ahorro total en ladrillera = 46,54 t/mes

En el área metropolitana de Cúcuta = 17.605 t/mes \* 66,48 kg/t carbón = 1.170,38 t/mes.

---

1 (TRM 2018/04/20): USD 1 = COP 2.724,47. EUR 1 = COP 3.389.

### 33.4 Resumen de ahorro usando el nutriente tecnológico

Tabla 50. Resumen de ahorro usando el nutriente tecnológico

Ítem	Unidades	Ladrillera	Área metropolitana de Cúcuta
<b>Huella de carbono</b>	T de CO <sub>2</sub> equivalente	70,80	2.061,04
<b>Inquemados</b>	t/mes	110	2.772,78
	Ahorro en millones de pesos	12,3	310,55
	Ahorro en dólares	3.488,38	84.415,11
<b>Ahorro por efectos energéticos asociados al proceso de fabricación</b>	t/mes	46,54	1.170,38
	Ahorro en millones de pesos	7,45	187,26
	Dólares	2612,77	65.705,54

Los valores que se tuvieron como referencia para realizar este estudio son:

- Carbón = COP 160.000/t.
- Inquemados = COP 112.000/t.

El ahorro energético expresado en términos de energía embebida se ha cuantificado en 47,88 kWh/t de producto terminado.

$$\frac{47,88\text{kwh}}{t} + \frac{125750t}{\text{mes}} = 6,020910 \text{ kwh/mes}$$

Este ahorro, en términos de consumo eléctrico, sería el equivalente al consumo eléctrico de 17.203 hogares en Cúcuta y su área metropolitana.

## CONCLUSIONES

A partir del proceso de caracterización realizado a las materias primas, se identificó que el material arcilloso usado en la región está predominantemente formado por cuarzo y fases del grupo de la arcilla como la moscovita y la caolinita. Debido a la composición establecida, se puede clasificar a este material como una arcilla caolinítica.

Los residuos de cisco de café y cascarilla de arroz son ricos en materia orgánica. Las pérdidas asociadas a fases como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina identificadas por TG/DSC alcanzan el 93% y el 80% respectivamente. La fase residual (ceniza) de la cascarilla de arroz es rica en silicio. En el caso del cisco de café, también se observa la presencia de silicio; sin embargo, se evidenciaron concentraciones importantes de potasio, calcio y magnesio, los cuales por sus capacidades fundentes podrían llegar a explicar el mejor comportamiento obtenido en cuanto a la resistencia mecánica a la flexión se refiere dentro del grupo de cerámicos evaluados.

En lo referente a los residuos de la combustión del carbón mineral, se evidenció por TG/DSC que ambos compuestos aún son ricos en materia orgánica. Para el caso de la ceniza de termoeléctrica, se observó que cerca de un 7,0% de la pérdida de masa corresponde a materia orgánica, mientras que para las cenizas del horno este valor puede superar el 70%. Este último hecho muestra la ineficiencia del proceso de combustión actual. Los componentes de tipo inorgánico hallados en



estos materiales son ricos en silicio y aluminio, los cuales se encuentran en fases amorfas y cristalinas como el cuarzo y la mullita.

En relación con el efecto de la concentración de los nutrientes en la pasta sobre las propiedades macroscópicas del cerámico, dos aspectos pueden mencionarse:

1. El más significativo fue la identificación de fenómenos de reducción química dentro de las probetas cerámicas (corazón negro en la jerga de los ceramistas). Esta característica fue evidenciada macroscópicamente en las probetas, incluso en temperaturas de cocción arriba de los 1.000 °C, en contraste con el material residual puro, donde la oxidación total no superó los 800 °C.
2. Los cerámicos elaborados con residuos agroindustriales presentaron mayores defectos estéticos respecto al uso de los cerámicos obtenidos con los residuos del proceso de combustión del carbón. Una rápida y excesiva formación de fase gaseosa pudo estar asociada a este comportamiento, puesto que se evidenció principalmente en los cerámicos con mayor concentración de residuo agroindustrial y cuando este se encontraba en menor tamaño de grano (caso de la pasta con cascarilla de arroz pasante malla 200).

Todos los residuos usados permiten reducir la contracción de secado de las probetas respecto al cerámico patrón (contracción del 8,21). Sin embargo, cada material presenta un comportamiento diferente a medida que se incrementa la concentración del residuo en la pasta. Al tomar el tamaño de grano “pasante malla 80 Tyler” en todas las pastas, se evidenció que no hay variaciones significativas al aumentar la concentración del residuo en la pasta. En la ceniza de termoeléctrica la contracción estuvo cercana al 5,6%.

Los inquemados de carbón tampoco mostraron variaciones significativas al incrementar la concentración de residuo. El valor de contracción de secado en este caso estuvo cercano al 7,0%, mientras que, en el caso del cisco de café, estuvo cercano al 6,6%, y en la cascarilla de arroz, al 5,2%. Cuando se modifica el tamaño de grano de la cascarilla de arroz, se evidenciaron cambios importantes en la contracción de secado. Al usar un tamaño de grano mayor (pasante malla 16), se observó una relación inversamente proporcional entre la concentración de cascarilla y el valor de contracción, llegando este a reducirse hasta 3,1% empleando 20% de residuo en la pasta.

Por otro lado, al usar un tamaño de grano muy fino (pasante malla 200) se evidenció un mayor grado de contracción respecto a los otros dos tamaños de grano, alcanzando un valor cercano al 7,4%, el cual se mantuvo sin variaciones significativas entre las diferentes concentraciones de nutriente.

En relación con la contracción lineal de cocción, solo los cerámicos con presencia de residuos de ceniza mostraron una menor reducción en el valor de esta variable respecto al dato obtenido para el material de referencia (3,71 en 1.200 °C). Este comportamiento en los cerámicos con residuos de café y arroz estaría asociado a la alta tasa de oxidación de la materia orgánica presente en estos residuos, que implica que los espacios dejados por estos materiales luego de combustión sean rellenados en parte por la fase vítrea formada a alta temperatura.

La porosidad del material correlacionada con la prueba de porcentaje de absorción de agua evidencia el comportamiento característico de disminución a medida que se incrementa la temperatura de cocción. Se observó que la porosidad aumenta a medida que se adiciona mayor cantidad de residuo en la pasta cerámica, tendencia similar a la expresada para la contracción de cocción, es decir, se da una mayor porosidad para los cerámicos elaborados con los residuos agroindustriales.

Con respecto a la velocidad de densificación en los materiales, se evidencia que en temperaturas entre 900 y 1.100 °C no hay diferencias tan significativas entre la absorción de agua del material cerámico de referencia y la de los obtenidos con baja presencia de residuo. Sin embargo, arriba de los 1.100 °C la densificación del material de referencia se ve muy favorecida, alcanzando un valor de absorción de agua de solo 1,86% en 1.200 °C, comparado con el 5,2% obtenido con el cerámico con inquemados de horno colmena (5% en la pasta), el cual obtuvo la absorción más baja entre los sustitutos usados con un valor de 5,19%. Un aspecto importante por resaltar aquí es el potencial del cisco de café, el cual alcanzó un valor de absorción de agua de 7,54% en 1.200 °C. Este dato es mucho más bajo que los obtenidos con todas las pastas preparadas con cascarilla de arroz (incluso modificando la granulometría), aun cuando las pérdidas de calcinación son mucho más elevadas en el cisco.

El seguimiento de la resistencia mecánica a la flexión con el incremento de la temperatura mostró varios aspectos importantes. En términos generales, una mayor concentración de residuo contribuye a disminuir la resistencia a la flexión.

En bajas temperaturas (debajo de 1.000 °C) se observó que la resistencia mecánica a la flexión se ve favorecida por la presencia de hasta 10% de residuos provenientes de la combustión del carbón, incluso superando el valor obtenido por el material cerámico de referencia. Un aspecto muy importante observado fue la presencia de un punto de inflexión para la resistencia a la flexión arriba de 1.150 °C; después de superada esta temperatura, la resistencia empieza a descender. A pesar del mayor grado de porosidad generado por el cisco de café, la presencia de hasta 10% de sustitución permite obtener los valores más altos de resistencia a la flexión dentro del grupo de pastas (con presencia de residuo) y rango de temperaturas evaluadas (30,09 N/mm<sup>2</sup> para el material de referencia y 25,6% para el cerámico

con 10% de cisco de café en la temperatura de 1.150 °C). En relación con el efecto granulométrico del cisco de café, el tamaño de grano intermedio (pasante malla 80) parece ser el más adecuado para obtener los valores más altos de resistencia mecánica a la flexión.

La resistencia a la abrasión profunda se evidenció en muchos de los resultados obtenidos, sobre todo a una temperatura entre 1.150 °C y 1.200 °C. No se evidencia una clara tendencia sobre la influencia de la concentración del residuo sobre esta variable. Por debajo de 1.000 °C la presencia del residuo parece favorecer el valor de resistencia a la abrasión, incluso superando el valor obtenido para el cerámico de referencia.

La comparación de los diferentes cerámicos elaborados permitió establecer que las pastas con 10% de ceniza volante (CT10) y 5% de cisco de café (CC5) son las que muestran el mejor comportamiento en cuanto a las variables físico-cerámicas evaluadas y cumplen con la gran mayoría de requisitos mínimos reportados en la literatura. La pasta CT10 fue seleccionada como la más adecuada en caso de ser llevada a un proceso aplicado real, ya que no es necesario realizar ningún proceso de molienda al residuo.

El análisis de conductividad térmica de CT10, CC5 y el material de referencia MA a las diferentes temperaturas de cocción dejó ver aspectos importantes en cuanto a la modificación de este parámetro debido a la presencia del nutriente. La formación de porosidad por consumo de la materia orgánica parece ser el factor relevante en este comportamiento, hecho que se hace más evidente con el incremento de la temperatura, haciendo que los materiales con presencia de residuo tengan un menor valor de conductividad. La microestructura parece tener influencia sobre la conductividad en bajas temperaturas, especialmente en el cerámico elaborado con ceniza volante. A su vez, la presencia de cuarzo y fase amorfa rica en silicio parece tener correlación con el resultado obtenido.

El análisis microestructural y topográfico realizado a los cerámicos elaborados con la pasta CT10 mediante DRX y MEB permite inferir que existen diferencias en el proceso de reacción a altas temperatura en comparación con el material de referencia. El aspecto más representativo identificado es la velocidad de transformación de la fase amorfa hacia fases cristalinas de alta temperatura como la cristobalita y la mullita. Este proceso de recristalización modifica el material, conllevando a reducir la densificación de este en temperaturas superiores a los 1.150 °C, lo que explica la reducción en los valores de resistencia mecánica a la flexión presentados en la sección de análisis físico-cerámico.

El análisis de la pasta CT10 mediante TG/DSC dejó ver que la presencia de ceniza de termoelectrónica en la pasta cerámica modifica la capacidad de absorción/

adsorción física de la pasta en comparación con la pasta de referencia MA. Este hecho trae consigo un menor consumo energético para la evaporación de dicha agua. De igual forma, la sustitución permite reducir el contenido de caolinita en la pasta, lo cual hace posible disminuir el calor requerido para la deshidroxilación de esta fase. Por otro lado, se evidenció que el carbono residual en la ceniza puede aportar energía al sistema acorde con el resultado de DSC. Todo ello trae consigo ahorro de combustible respecto a las condiciones de operación inicial.

La viabilidad medioambiental del uso de cenizas volantes en la fabricación de productos cerámicos queda demostrada a partir del análisis de huella de carbono y energía embebida llevado a cabo.

Es importante destacar en este punto que otros aspectos de interés medioambiental y positivos para la economía circular no han sido analizados de manera comparativa al ser claramente favorecedor el uso de cenizas volantes. Tal es el caso de aspectos como el tratamiento de residuos o la extracción de recursos naturales. Tomando en consideración estos factores, la mejora medioambiental que se produce con el desarrollo del proceso innovador de uso de cenizas volantes es aún mayor que lo determinado y cuantificado en el presente estudio.

Económicamente, el uso del nutriente tecnológico supone un ahorro, a partir de un menor uso de combustible en el proceso de fabricación de los productos cerámicos.

El proceso innovador descrito, validado de manera positiva tecnológica, medioambiental y económicamente, puede suponer una oportunidad para el sector cerámico de Norte de Santander de posicionarse en ventaja respecto de la competencia.

En conclusión, la mejora que supone el proceso innovador descrito y validado, en los tres ejes de la sostenibilidad (económica, social y medioambiental), certifica que el uso del nutriente tecnológico como materia prima en la fabricación de cerámicos contribuye de manera positiva al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible de Colombia.



## FUTURAS INVESTIGACIONES

Los resultados del estudio llevado a cabo contribuyen a despejar incógnitas sobre el uso de nutrientes tecnológicos en la fabricación de cerámicos en la región de Norte de Santander, al mismo tiempo que genera hipótesis y abre nuevas vías de trabajo e investigación.

A continuación se relacionan algunas líneas de investigación que se han detectado y que pueden ser objeto de interés, atendiendo al trabajo desarrollado en esta tesis:

- Producto de los resultados obtenidos en el presente trabajo, es recomendable seguir el estudio de los residuos en la industria cerámica. Un aspecto importante que debería ser considerado es el uso de ceniza de cisco de café en vez del cisco como tal, debido a los resultados de composición química y resistencia mecánica a la flexión obtenidos.
- Otra posibilidad con el cisco de café es evaluar el efecto de la granulometría a fin de identificar si hay alguna influencia, tal como se realizó con la cascarilla de arroz.
- El uso de atmósfera reductora podría ser otro aspecto que podría llegar a ser de interés en el estudio del uso de residuos en la industria cerámica.
- También podría ser de interés la realización del mismo estudio, pero empleando el método de conformado por prensa. Este aspecto se propone ya que se han evidenciado diferencias en las propiedades tecnológicas de los

cerámicos obtenidos al usar ambas técnicas de moldeo empleando la misma pasta cerámica.

- Producto del proceso de caracterización de los inquemados del horno colmena, se evidenció un alto nivel de ineficiencia del proceso de combustión actual (pérdidas de calcinación por materia orgánica muy elevadas acorde con el análisis de TG/DSC); por tanto, se recomienda la realización de estudios que conlleven a hacer más eficiente este proceso.
- La metodología de trabajo propuesta es susceptible de ser utilizada en otras líneas de investigación que consideren el impacto ambiental de la edificación a partir del análisis del impacto asociado a los materiales de construcción.
- Profundizar en el estudio de las diferentes alternativas existentes de uso de nutrientes tecnológicos en la fabricación de cerámicos permitirá el desarrollo de productos con mejores prestaciones, con miras a cumplir los requisitos medioambientales que se establecerán a corto y medio plazo para los productos de construcción.

# REFERENCIAS



- Abu-Ghunmi, D.; Abu-Ghunmi, L.; Kayal, B. & Bino, A. (2016). Circular Economy and the Opportunity Cost of Not 'Closing the Loop' of Water Industry: The Case of Jordan. *Journal of Cleaner Production*, 131: 228-236.
- Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (2003). *Factores de emisión de los combustibles colombianos*. Disponible en: [http://www.siamе.gov.co/siamе/documentos/documentacion/mdl/HTML/18\\_FECOC.htm](http://www.siamе.gov.co/siamе/documentos/documentacion/mdl/HTML/18_FECOC.htm)
- Acchar, W. & Dultra, E. (2015). *Ceramic Materials from Coffee Bagasse Ash Waste*. Brasil: SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology.
- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36: 327-363.
- Ahumada, L.M. & Rodríguez-Páez, J.E. (2006). Uso del SiO<sub>2</sub> obtenido de la cascarilla de arroz en la síntesis de silicatos de calcio. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 30(117): 581-594. ISSN 0370-3908. Disponible en: [http://www.accefyn.org.co/revista/Vol\\_30/117/581%20a%20594.pdf](http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_30/117/581%20a%20594.pdf).
- Alonso-Santurde, R.; Coz, A.; Viguri, J.R.; Andres, A. (2012). Recycling of Foundry Byproducts in the Ceramic Industry: Green and Core Sand in Clay Bricks. *Constr. Build Mater*, 27: 97-106.
- Amell, A.; Chejne, F.; López, D.; Forero, C.; Herrera, B.; Alvarado, P.; Ceballos, C.; Giraldo, S.; Porras, J.; Mejía, A.; González, D. & Velasco, F. (2016). *Consultoría técnica para el fortalecimiento y mejora de la base de datos de factores de emisión de los combustibles colombianos-FECOC*. Disponible en: [http://www.upme.gov.co/calculadora\\_emisiones/aplicacion/Informe\\_Final\\_FECOC.pdf](http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/Informe_Final_FECOC.pdf).
- American Coal Ash Association Educational Foundation. (s.f). *Sustainable Construction with Coal Combustion Products*. Disponible en: [https://www.aaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/Sustainability\\_Construction\\_w\\_CCPs\(Consolidated\).pdf](https://www.aaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/Sustainability_Construction_w_CCPs(Consolidated).pdf).
- American Society for Testing and Materials (2012). *ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*.
- American Society for Testing and Materials (s.f). *ASTM C326-03. Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays*.



- Andersen, M. S. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science*, 2(1): 133-140.
- Araújo Ibarra & Asociados S.A. (2006). *Quinientos nuevos productos y servicios, para nueve regiones de Colombia, con gran potencial de mercado en Estados Unidos*.
- Argiz, C. G. (2014). *Estudio de la utilización de cenizas de cenicero de centrales termoeléctricas de carbón como adición del cemento portland, análisis comparativo con las cenizas volantes*. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: [http://oa.upm.es/30411/1/Cristina\\_Argiz\\_Lucio.pdf](http://oa.upm.es/30411/1/Cristina_Argiz_Lucio.pdf).
- Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos (ASCER) (s.f.). *Cerámica para la arquitectura, fundamentos*. Disponible en: <http://www.ascer.es/verFotoHD.ashx?id=36>.
- Bartoňová, L. (2015). Unburned carbon from coal combustion ash: An overview. *Fuel Processing Technology*, 134: 136-158.
- Boltakova, N. V.; Faseeva, G. R.; Kabirov, R. R.; Nafikov, R. M. & Zakharov, Y. A. (2016). *Utilization of Inorganic Industrial Wastes in Producing Construction Ceramics. Review of Russian Experience for the Years 2000-2015*. Waste Management.
- Bovea, M. D.; Díaz-Albo, E.; Gallardo, A.; Colomer, F. J. & Serrano, J. (2010). Environmental Performance of Ceramic Tiles: Improvement Proposals. *Materials & Design*, 31(1): 35-41.
- Burgos, C. H. (2011). *Propuesta para el control y seguimiento del proceso de empaquetado de la empresa Arrocería Gelvez S.A. Prácticas industriales: ingeniería industrial*. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ingeniería.
- Caballero, L. & Médico, O. (2013). *Caracterización y posible uso de cenizas resultantes de la combustión del carbón, en la futura termocentral de lecho fluidizado*. Río Turbio, Argentina. Recuperado el 29 de julio de 2016. Disponible en: <http://www.redisa.uji.es/artSim2013/CaracterizacionDeResiduosSolidos/Caracterizacion%20Cenizas%20Combustion%20Carbon.pdf>.
- Café de Colombia (s.f.). *Un producto especial: post-cosecha*. Disponible en: [http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre\\_el\\_cafe/el\\_cafe/post-cosecha/](http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/post-cosecha/).

- Carrasco, J. (2014). *Factores de emisión considerados en la herramienta de cálculo de la huella de carbono corporativa*. CAEM.
- Castells, E. & Cadavid, C. (2011). El análisis del ciclo de vida: una herramienta para medir la eficiencia en el sector cerámico. *Residuos: Revista técnica*, 122: 36-45.
- Chur, G. (2012). *Evaluación del uso de la cascarilla de arroz como agregado orgánico en morteros de mampostería*. Trabajo de grado. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. Disponible en: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_3173\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3173_C.pdf).
- Colegio Territorial de Arquitectos de Castellón (s.f.). *Guía de la baldosa cerámica*. Disponible en: [http://www.g2arquitectos.es/enlacesinteres/archivos/004\\_guia\\_baldosa\\_ceramica.pdf](http://www.g2arquitectos.es/enlacesinteres/archivos/004_guia_baldosa_ceramica.pdf).
- Contreras, H. (2008). *Análisis del mejoramiento del análisis de secado de la arrocera Gelvez S.A.* Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente.
- Cultrone, G. & Sebastián, E. (2009). Fly Ash Addition in Clayey Materials to Improve the Quality of Solid Bricks. *Construction and Building Materials*, 23: 1178-1184.
- DANE (febrero, 2016). *Boletín técnico: Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado II Semestre de 2015 (Datos definitivos)*. Bogotá, D.C. Recuperado el 12 de mayo de 2016. Disponible en: [http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/bol\\_arroz\\_IIsem15.pdf](http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/bol_arroz_IIsem15.pdf).
- De los Ríos, I. C. & Charnley, F. (2016). Skills and Capabilities for a Sustainable and Circular Economy: The Changing Role of Design. *Journal of Cleaner Production*. En prensa.
- Demir, I. (2006). An investigation on the production of construction brick with processed waste tea. *Build Environ*, 41: 1274-8.
- Díaz, C. X. (2014). *Elaboración y caracterización de un material compuesto, de matriz polvos de arcilla atomizados y refuerzo residuos de la combustión del carbón, conformado por prensado uniaxial*. Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales. Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Francisco de Paula Santander.
- Díaz, I. (2015). *Informe de resultados. Análisis comparativo de las propiedades del conjunto de arcillas del proyecto: Fortalecimiento a 10 empresas del Clúster de la*

*cerámica de Norte de Santander a través de la estandarización de sus principales productos a la Norma Técnica Colombiana.*

- Dondi, M.; Guarini, G.; Raimondo, M. & Zanelli, C. (2009). Recycling PC and TV waste glass in clay bricks and roof tiles. *Waste Manage (Oxford)*, 29(6): 1945-51.
- Dorado Guerra, H. F. (2015). *Uso de subproductos de la industria de café y caña de azúcar como fundente y formador de poros en la manufactura de ladrillos de arcilla roja*. Proyecto de grado Ingeniería de Materiales. Universidad del Valle.
- Echeverría, M. & López, O. (2010). *Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica*. Proyecto de grado de Ingeniero Mecánico. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2058/1/CD-2863.pdf>.
- Eliche, D. & Corpas, F. A. (2014). Utilisation of spent filtration earth or spent bleaching earth from the oil refinery industry in clay products. *Ceramics International*, 40: 16677-16687.
- Eliche, D.; Martínez, S.; Pérez, L.; Iglesias, F. J.; Martínez, C. & Corpas, F. A. (2012). Valorization of biodiesel production residues in making porous clay brick. *Fuel Processing Technology*, 103: 166-173.
- Eliche, D.; Martínez, C.; Martínez, M. L.; Cotes, M. T.; Pérez, L.; Cruz, N. & Corpas, F. A. (2011). The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. *Applied Clay Science*, 52: 270-276.
- Ellen Macarthur Foundation. (2013). *Ellen Macarthur Foundation*. Disponible en: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/>.
- European Environment Agency (2016). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016*. ISSN 1977-8449.
- Enrique, J. (s.f.). *Requisitos técnicos de baldosas cerámicas para usos concretos*. Disponible en: <http://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdf/9411060s.pdf>.
- Esmaeilian, B.; Behdad, S. & Wang, B. (2016). The Evolution and Future of Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing Systems*, 39: 79-100.
- European Commission (mayo de 2014). *Report on Critical Raw Materials for the EU: Report of the AdHoc Working Group on Defining Critical Raw Materials*. Disponible en: <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/10010/attachments/1/translations>.

- European Environment Agency. (2016). *Circular Economy in Europe: Developing the Knowledge Base*. Luxemburgo: Publications Office of the European Union.
- Fang, Y.; Côté, R. P. & Qin, R. (2006). Industrial Sustainability in China: Practice and Prospects for Eco-Industrial Development. *Journal of Environmental Management*, 83(3) : 315-328.
- Fauzi, A.; Nuruddin, M. F.; Malkawi, A. B.; Abdullah, M. M. (2016). Study of Fly Ash Characterization as a Cementitious Material. *Procedia Engineering*, 148: 487-493.
- Federación Nacional de Cafeteros en Colombia (2014). *Informe de comités departamentales. Por la caficultura que queremos*. LXXX Congreso Nacional de Cafeteros 2014. Disponible en: [https://www.federaciondecafeteros.org/static/files/Informe\\_Comites\\_2014p.pdf](https://www.federaciondecafeteros.org/static/files/Informe_Comites_2014p.pdf).
- Földvári, M. (2011). *Handbook of Thermogravimetric System of Minerals and its Use in Geological Practice*. Geological Institute of Hungary.
- García, E. G. & Mendiola, L. L. (2016). Evaluación de las propiedades físico mecánicas de ladrillos de arcilla recocida, elaborados con incorporación de residuos agrícolas, caso Chiapas, México. *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*, 19(2): 91-101.
- García-Ubaque, C. A.; Giraldo, L. & Moreno-Piraján, J. C. (2013). Quality Study of Ceramic Bricks Manufacture with Clay and Ashes from the Incineration of Municipal Solid Wastes. *Afinidad*, 70(561).
- García-Ubaque, C. A.; Moreno-Piraján, J. C.; Giraldo-Gutiérrez, L. & Sapag, K. (2007). Stabilization/Solidification of Ashes in Clays Used in the Manufacturing of Ceramic Bricks. *Waste management & research*, 25(4): 352-362.
- García-Ubaque, C. A., González-Hässig, A., & Vaca-Bohórquez, M. L. (2013). Ceramic Bricks Made from Municipal Solid Waste Incineration-Derived Clay and Ashes: a Quality Study. *Ingeniería e Investigación*, 33(2): 36-41.
- Geissdoerfer, M.; Savaget, P.; Bocken, N. & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143: 757-768.
- Gelves, J. F.; Monroy, R.; Sánchez, J. & Ramírez, R. (2013). Estudio comparativo de las técnicas de extrusión y prensado como procesos de conformado de productos cerámicos de construcción en el área metropolitana de Cúcuta. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y vidrio*, 52(1): 48-54.

- Ghisellini, P. ; Cialani, C. & Ulgiati, S. (2016). A Review on Circular Economy: the Expected Transition to a Balanced. *Journal of Cleaner Production*, 114: 11-32.
- Gobernación Norte de Santander, Sistema de información subregional (s.f.). *Caracterización Norte de Santander*. Disponible en: [http://www.sisubregionalns.gov.co/files/sid\\_Ordenamiento\\_territorial/Caracterizacion\\_Dpo/Aspectos\\_Economicos\\_I\\_parte.pdf](http://www.sisubregionalns.gov.co/files/sid_Ordenamiento_territorial/Caracterizacion_Dpo/Aspectos_Economicos_I_parte.pdf).
- Gómez, F. (2011). *Aprovechamiento de cenizas de carbón mineral producidas en la industria local como material conglomerante en la construcción*. Tesis de maestría. Universidad de Medellín, Facultad de ingeniería. Disponible en: <http://repository.udem.edu.co/handle/11407/65?locale-attribute=en>.
- Gómez, T. & Mantilla, J. (1993). *Aprovechamiento del aserrín y la cascarilla de arroz en la fabricación de tabletas tipo cerámica*. Trabajo de grado en Tecnología Química. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Gómez, P. P.; Hincapié, C. M. B. & Rivera, A. R. (2011). Estimación de los parámetros cinéticos y tiempo de vida de la cáscara de arroz y arcilla mediante la técnica de análisis termogravimétrico (tga). *Dyna*, 78(165): 207-214.
- González, D. R.; Pérez, L.; Santa, A. & Ramírez, J. H. (2014). Producción y caracterización de zeolita obtenida a partir de ceniza volante mediante DRX. *Momento*, 48E: 52-60.
- Greenberg, A. (2014). *How Coffee Works: 10 Steps from Shrub to Mug (infographic)*. Recuperado el 8 de septiembre de 2016. Disponible en: <https://tazzadiluna.com/2014/05/02/how-coffee-works/>.
- Guzmán, Á.; Delvasto, S.; Sánchez, E. & Amigó, V. (2013a). Cenizas del tamo de arroz como sustituto del feldespatos en la fabricación de cerámica blanca. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52(1): 25-30.
- Guzmán, Á.; Torres, J.; Cedeo, M. & Delvasto, S. (2013b). Fabricación de gres porcelánico empleando ceniza de tamo de arroz en sustitución del feldespatos. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52(6): 283-290.
- Ha, J.; Chae, S.; Chou, K. W.; Tyliczszak, T. & Monteiro, P. J. M. (2016). Characterization of Class F Fly Ash Using STXM: Identifying Intraparticle Heterogeneity at Nanometer Scale. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials*, Article ID 8072518: 1-7.
- Iglesias, I.; Acosta, A. & García, E. (2013). Recycling of Residual IGCC Slags and their Benefits as Degreasers in Ceramics. *Journal of Environmental Management*, 129: 1-8.

- Iglesias, I.; Acosta, A.; García, E. & Rincón, J. M. (2015). *Mejora de las propiedades cerámicas de arcillas comunes por adición de ceniza volante GICC*. XXIV Reunión de la Sociedad Española de Arcillas 2015 (pp. 31-32). Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/125217>.
- Illic, M. & Nikolic, M. (2016). Drivers for Development of Circular Economy. A case Study of Serbia. *Habitat International*, 56: 191-200.
- IPCC (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. ISBN 92-9169-320-0.
- Jawahir, I. S. & Bradley, R. (2016). Technological Elements of Circular Economy and the Principles of 6R-Based Closed-loop Material Flow in Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, 40: 103-108.
- Jeskar, Ltda. (2000). *Inventario geológico minero, ambiental, tecnológico y empresarial de los minerales no energéticos del Norte de Santander*. San José de Cúcuta, Colombia: Jeskar Ltda.
- Kisella, A. M.; Czaka, K. M.; Moron, W.; Ryback, W. & Andryjowicz C. (2016). *Unburned carbon from lignite fly ash as an adsorbent for SO2 removal*.
- Kockal, N. (2012). Utilization of different types of coal fly ash in the production of ceramic tiles. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 51(5): 297-304.
- Leal, E. J. (2012). *Propuesta de mejora en el proceso de despolvamiento para las etapas de prelimpieza y secamiento del arroz paddy verde en la empresa arrocera Agua Clara S.A.S. ubicada en la ciudad de San José de Cúcuta*. Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ingeniería.
- Lett, L. A. (2014). Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular. *Revista Argentina de Microbiología*, 46(1): 1-2.
- Lieder, M. & Rashid, A. (2016). Towards Circular Economy implementation: A Comprehensive Review in Context of Manufacturing Industry. *Journal of Cleaner Production*, 115(1): 36-51.
- Lombana, C. (2011). *Diseño de explotación a cielo abierto de la mina cerámica Murano, en el municipio de El Zulia vereda La Alejandra*.
- López, J. L.; Tarantino, C. & Aranguren, S. (2010). Metodología para la selección de los instrumentos que mayor impacto de fallas presentan en el generador de vapor de la empresa Termotasajero Colgener. *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas*, 1(15): 112-19.

- Madurwar, M. V.; Ralegaonkar, R. V. & Mandavgane, S.A. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 38: 872-878.
- Manals-Cutiño, E.; Penedo-Medina, M. & Giralt-Ortega, G. (2011). Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. *Tecnología Química*, 31(2): 36-43.
- Mann, H. S.; Brar, G. S.; Mann, K. S. & Mudahar, G. S. (2016). *Experimental Investigation of Clay Fly Ash Bricks for Gamma-Ray Shielding*, *Nuclear Engineering and Technology*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.net.2016.04.001>.
- Martínez, J. D. & Becerra, N. A. (2007). *Elaboración de un manual de procedimientos operativos basado en la norma ISO 9000:2000 para las áreas agroindustriales de recepción de café pergamino, trillado, tostado, molido y empaque en la comercializadora Gonlo Ltda.* Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente.
- Martínez, C.; Cotes, T. & Corpas, F. A. (2012). Recovering Wastes from the Paper Industry: Development of Ceramic Materials. *Fuel Processing Technology*, 103: 117-124.
- McDonough, W.; Braungart, M.; Anastas, P. T. & Zimmerman, J. B. (2003). Peer Reviewed: Applying the Principles of Green Engineering to Cradle-to-Cradle Design. *Environmental Science & Technology*, 37: 434A-441A.
- Mehment, B. & Kizgut, S. (2016). Modeling of Unburned Carbon in Fly Ash and Importance of Size Parameters. *Fuel Processing Technology*, 143: 7-17.
- Mejía, L. V. & Montes, A. Y. (2013). *Rediseño técnico para la línea de producción del café molido en la empresa Cafecrisol, Villa del Rosario-Norte de Santander.* Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente.
- Mejía, J. M.; Rodríguez, E. D. & Mejía, R. (2014). Utilización potencial de una ceniza volante de baja calidad como fuente de aluminosilicatos en la producción de geopolímeros. *Ingeniería y Universidad*, 18(2): 309-327.
- Mendoza, I. & Mantilla, T. (1994). *Estudio para la elaboración de ladrillos de construcción a partir de las cenizas volantes de carbón.* Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Menezes, R. R.; Ferreira, H. S.; Neves, G. A.; Lira, H. D. L. & Ferreira, H. C. (2005). Use of Granite Sawing Wastes in the Production of Ceramic Bricks and Tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, 25(7): 1149-1158.



- Ministerio de Minas y Energía & UPME (2012). *Cadena del carbón*. Colombia. ISBN: 978-958-8363-12-7. Recuperado el 29 de julio de 2016. Disponible en: [http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena\\_Carbon\\_2012.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_Carbon_2012.pdf).
- Minminas (s.f.). *Precios de combustibles*. Disponible en: <https://www.minminas.gov.co/precios-de-combustible>.
- Molina, J. S. & Díaz, J. F. G. (2012). Caracterización tecnológica y del talento humano de las empresas fabricantes de cerámica roja ubicadas en el área metropolitana de Cúcuta. *Respuestas*, 17(2): 71-80.
- Montilla, J.; Arcila, J.; Aristizábal, M.; Montoya, E.; Puerta, G.; Oliveros, C. & Cadena, G. (2008). Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional. *Cenicafe*, 59(2): 120-142. Disponible en: [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc059\(02\)120-142.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc059(02)120-142.pdf).
- Mora, R. L. (2015). *Caracterización de arcillas provenientes de la mina Murano del municipio del Zulia, Norte de Santander, Colombia*. Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona. Facultad de ciencias básicas. Maestría en Química.
- Naciones Unidas (1998). *Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.
- Naustdalslid, J. (2014). Circular Economy in China – the Environmental Dimension of the Harmonious Society. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 21(4): 303-313.
- O'Neill, B. C. & Oppenheimer, M. (2002). Dangerous Climate Impacts and the Kyoto Protocol. *Science*, 296(5575): 1971-1972.
- Palacios, L. & Betancurt, E. (02 de agosto de 2005). *Caracterización de propiedades fluidodinámicas de lechos fluidizados en frío con mezclas de carbón-biomasa, usados en procesos de co-gasificación*. Medellín, Colombia.
- Panwar, N. L.; Kaushik, S. C. & Kothari, S. (2011). Role of Renewable Energy Sources in Environmental Protection: a Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3): 1513-1524.
- Pedroza, A. (1996). *Formación León y Grupo Guayabo: Fuentes de provisionadoras de arcillas en el área de Cúcuta, Norte de Santander*. Texto conferencia. Cúcuta.
- Peña, G. & Ortega, L. (2014). Caracterización morfológica y estructural de polvos de cenizas volantes. *Revista I +D*, 14(2): 14-19.



- Pérez, L.; Corpas, F. A.; Martínez, S.; Artiaga, R. & Pascual, J. (2012a). Manufacturing New Ceramic Materials from Clay and Red Mud Derived. *Construction and Building Materials*, 35: 656-665.
- Pérez, L.; Eliche, D.; Iglesias, F. I.; Martínez, C. & Corpas, F. A. (2012b). Recycling of Ash from Biomass Incinerator in Clay Matrix to Produce Ceramic Bricks. *Journal of Environmental Management*, 95: S349-S354.
- Pinzón, A. L. (2008). *Diseño del sistema de monitoreo y supervisión del proceso de trillado de café en la empresa Almacafé de Cúcuta*. Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ingeniería.
- Portillo Rodríguez, A. (2015). *Efectos de la adición de polvos de cascarilla de arroz en las propiedades mecánicas y térmicas de un material compuesto a base de polvos de aluminosilicatos atomizados, elaborado por proceso de extrusión*. Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Preston, F. (1 de marzo de 2012). *Research: A Global Redesign? Shaping the Circular Economy*. Disponible en: <https://www.chathamhouse.org/publications/papers/view/182376>.
- Quiceno, D. (2010). *Alternativas tecnológicas para el uso de la cascarilla de arroz como combustible*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- Rajamannan, B.; Sundaram, C. K.; Viruthagiri, G. & Shanmugam, N. (2013). Effects of Fly Ash Addition on the Mechanical and Other Properties of Ceramic Tiles. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 2(1): 486-491. ISSN (Online):2278-5299.
- Ramírez, Y. (2012). *Determinación de las fases presentes en pisos y revestimientos cerámicos a base de arcilla cocidos a diferentes temperaturas y su influencia en las propiedades técnicas*. Maestría en Ingeniería, Materiales y Procesos. Facultad de Ingenierías, Universidad Nacional de Colombia.
- Ríos, C. (2009). *Uso de materias primas colombianas para el desarrollo de baldosas cerámicas con alto grado de gresificación*. Tesis de maestría. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
- Rivera, R. & Rodríguez, H. (1992). *Estudio de la ceniza del carbón en la elaboración de ladrillos refractarios*. Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Ruiz, J. M.; Alonso C.; Cambroner, L. E.; Corpas, F.; Alfonso, M. & Moraño, A. J. (2000). Aprovechamiento de las cenizas volantes, clase F, de centrales térmicas

- para la fabricación de materiales cerámicos. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 39(3): 229-231.
- Sánchez, J. (2014). *Caracterización físico química de las arcillas rojas del área metropolitana de Cúcuta*. Facultad de ciencias básicas. Departamento de Química. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Sánchez, J. & Ramírez, P. (2013). *El clúster de la cerámica del área metropolitana de Cúcuta*. Editorial Universidad Francisco de Paula Santander. ISBN: 978-958-8489-37-7.
- Sánchez, J. & Rozo, S. (2013). *Evaluación de los cambios en las propiedades térmicas y mecánicas del bloque # 5 fabricado en la región, según las mezclas entre arcilla y residuos industriales*. Informe final presentado a Colciencias convocatoria. Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica, Universidad Francisco de Paula Santander.
- Schell, C. (2016). Beyond sustainability. Transforming industrial zero-valued residues into increasing economic returns. *Journal of Cleaner Production*, 131: 376-386.
- Segerson, K. & Miceli, T. J. (1998). Voluntary Environmental Agreements Good or Bad News for Environmental Protection? *Journal of Environmental Economics and Management*, 36(2): 109-130.
- Senneca, O. (2008). Burning and physico-chemical characteristics of carbon in ash from a coal fired power plant. *Fuel*, 87: 1207-1216.
- Shen, X. & Qi, C. (2012). Countermeasures towards Circular Economy Development in West Regions. *Energy Procedia*, 16: 927-932.
- Sistema de Información Eléctrico Colombiano (2015). *Evolución variables de generación: Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano de diciembre de 2015*. Recuperado el 29 de julio de 2016. Disponible en: <http://www.siel.gov.co/Inicio/Generaci%C3%B3n/Estad%C3%ADsticasyvariablesdegeneraci%C3%B3n/tabid/115/Default.aspx>.
- Smykatz-Kloss, W. (1974). *Differential Thermal Analysis, Application and Results in Mineralogy*. Berlín: Springer-Verlag.
- Soltani, N.; Bahrami, A.; Pech, M. I. & González, L. A. (2015). Review on the Physicochemical Treatments of Rice Husk for Production. *Chemical Engineering Journal*, 264: 899-935.

- Souza, A. E.; Teixeira, S. R.; Santos, G. T.; Costa, F. B. & Longo, E. (2011). Reuse of Sugarcane Bagasse Ash (SCBA) to Produce Ceramic Materials. *Journal of Environmental Management*, 92(10): 2774-2780.
- Steffen, W.; Richardson, K.; Rockström, J.; Cornell, S.; Fetzer, I.; Bennett, E. & Sörlin, S. (2015). Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science*, 347(6223): 1-15.
- Su, B.; Almas, H.; Geng, Y. & Yu, X. (2013). A Review of the Circular Economy in China: Moving from Rhetoric to Implementation. *Journal of Cleaner Production*, 42: 215-227.
- Sutcu, M. & Akkurt, S. (2009). The Use of Recycled Paper Processing Residues in Making Porous Brick with Reduced Thermal Conductivity. *Ceramics International*, 35(7): 2625-2631.
- Teixeira, S. R.; Santos, G. T.; Souza, A. E.; Alessio, P.; Souza, S. A. & Souza, N. R. (2011). The Effect of Incorporation of a Brazilian Water Treatment Plant Sludge on the Properties of Ceramic Materials. *Applied Clay Science*, 53: 561-565.
- Temuujin, J.; Rickard, W. & Riessen, A. (2013). Characterization of Various Fly Ashes for Preparation of Geopolymers with Advanced Applications. *Advanced Powder Technology*, 24: 495-498.
- Termotasajero S.A. E.S.P. (2008). *Sistemas de planta*.
- Termotasajero S.A. E.S.P. (s.f.). *Proceso industrial*. Disponible en: [http://www.termotasajero.com.co/page/index.php?option=com\\_content&task=view&id=17&Itemid=36](http://www.termotasajero.com.co/page/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=36).
- Tikul, N. & Srichandr, P. (2010). Assessing the Environmental Impact of Ceramic Tile Production in Thailand. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 118(1382): 887-894.
- Tiles & Bricks Europe (2014). *TBE PCR for Clay Construction Products Guidance document for developing an EPD*. Tiles & Bricks Europe. Disponible en: [www.tiles-bricks.eu/publications/](http://www.tiles-bricks.eu/publications/).
- Torres, P.; Hernández, D. & Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(3): 145-154.
- Tukker, A. (2015). Product Services for a Resource-Efficient and Circular Economy-a Review. *Journal of Cleaner Production*, 97: 76-91.

- UNESA (s.f.). *Central térmica convencional de carbón*. Disponible en: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1351-central-termica>.
- Universidad de los Andes, Centro de estudios de Fronteras e Integración (CEFI), (Venezuela) (s.f.). *Propuesta de definición y delimitación de la zona de integración fronteriza: área Norte de Santander (Colombia)–Táchira (Venezuela)*. Corporación Universidad Libre de Colombia, Seccional Cúcuta, Colombia. Universidad Francisco de Paula Santander.
- UPME. (2010). *Proyección de demanda de energía en Colombia*. Bogotá.
- UPME (2017). *Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano*.
- Valencia, N. Y. (2010). Los subproductos del café: fuente de energía renovable. *Avances Técnicos Cenicafé* 393: 8.
- Vargas, S. & Cristancho, L. (1986). *Aplicación de los desechos industriales, cenizas volantes y escorias de carbón en la elaboración de ladrillos de construcción*. Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Vásquez, O. (2015). *Etanol lignocelulósico, a partir de cascarilla de café, por medio de hidrólisis química-enzimática y fermentación*. Tesis de grado: Maestría en Ingeniería Energética. Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Disponible en: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/41986/1/VazquezMoralesOscar.pdf>.
- Velásquez, L. F.; De La Cruz, J. F.; Sánchez J. F. & Marín, M. A. (2007). Remoción de carbón inquemado de las cenizas volantes producidas en el proceso de combustión de carbón. *Revista Energética*, 38: 107-108.
- Winans, K.; Kendall, A. & Deng, H. (2017). The History and Current Applications of the Circular Economy Concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(11): 825-833.
- World Coal Association (2016). *Statistics: Coal Facts 2015*. Recuperado el 29 de julio de 2016. Disponible en: <http://www.worldcoal.org/resources>.
- Wua, H.; Shi, Y.; Xiaa, Q. & Zhu, W. D. (2014). Effectiveness of the Policy of Circular Economy in China: A DEA-Based Analysis for the Period of 11th Five-Year-Plan. *Resources, Conservation and Recycling*, 83: 163-175.
- Xinan, L. & Yanfu, L. (2011). Driving Forces on China's Circular Economy: From

Government's perspectives. *Energy Procedia*, 5: 297-301.

Yap, N. U. (2005). Towards a Circular Economy: Progress and Challenges. *Green Management*, 50: 11-24.

Yu, J.; Li, X.; Fleming, D.; Meng, Z.; Wang, D. & Tahmasebi, A. (2012). Analysis on Characteristics of Fly Ash from Coal Fired Power Stations. *Energy Procedia*, 17: 3-9.

Zhang, L. (2013). Production of Bricks from Waste Materials-A Review. *Construction and Building Materials*, 47: 643-655.

Zhang, K. M. & Wen, Z. G. (2008). Review and Challenges of Policies of Environmental Protection and Sustainable Development in China. *Journal of Environmental Management*, 88(4): 1249-1261.



Este libro fue compuesto en caracteres Minion a 11 puntos, impreso sobre papel Bond de 75 gramos y encuadernado con el método hot melt, en diciembre de 2018, en Bogotá, Colombia.

# APLICACIONES DE LOS NUTRIENTES TECNOLÓGICOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA DEL ÁREA METROPOLITANA DE CÚCUTA

Este libro surge de la importancia que representa el sector cerámico para la economía del departamento Norte de Santander, parte de un hecho relevante: en el territorio existe una gran cantidad de residuos orgánicos e inorgánicos (industriales/agroindustriales) que no tienen una aplicación representativa en la actualidad. En el texto se plantea la posibilidad de que algunos de estos residuos puedan actuar como nutrientes tecnológicos, a fin de sustituir parte de los materiales arcillosos durante el proceso de fabricación de materiales cerámicos de construcción en la región.

La obra está distribuida en ocho capítulos, ordenados de la siguiente manera: Incorporación de los nutrientes tecnológicos en la industria cerámica del área metropolitana de Cúcuta; Descripción de las materias y el proceso cerámico; Caracterización de las materias primas; Efecto de la concentración de nutrientes tecnológicos sobre las principales variables tecnológicas de un material cerámico; Efecto de la concentración del Nutriente Tecnológico sobre la microestructura del material cerámico seleccionado (CT10); Efecto de la concentración del nutriente tecnológico en la capacidad de aislamiento térmico del material; Efectos energéticos/ambientales de la presencia del nutriente tecnológico en el material cerámico de mejor comportamiento, y Efecto económico del uso de Nutriente Tecnológico.

El texto está dirigido a estudiantes, profesionales, investigadores, arquitectos, empresarios del sector cerámico, y comunidad en general, interesada en el conocimiento de avances en el uso de residuos orgánicos/inorgánicos, en la fabricación de materiales cerámicos en el marco de una construcción sostenible.

## Incluye

- ▶ Avances en el uso de residuos orgánicos e inorgánicos en materiales cerámicos de construcción.
- ▶ Interesantes propiedades tecnológicas de los materiales cerámicos obtenidos.
- ▶ Incidencia ambiental de los materiales de construcción sostenible.

### Jorge Sánchez Molina

Ingeniero Químico de la U. Industrial de Santander, Magíster en Gerencia de Empresas de la U. Nacional Experimental del Táchira y Doctor en Avances en Ingeniería de los Materiales y Energías de la U. de Jaén, en donde realizó investigaciones acerca del empleo de los nutrientes tecnológicos en la Industria cerámica. Director General del Centro de Investigación de Materiales Cerámicos CIMAC y Director del grupo de investigación en Tecnología Cerámica GITEC.

### Francisco Antonio Corpas Iglesias

Ingeniero de Materiales egresado de la U. Politécnica de Madrid y Doctor por la E.T.S de Ingenieros de minas de Madrid. Docente del departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales de la U. de Jaén, Escuela politécnica superior de Linares. Director del grupo de investigación en Ingeniería de Materiales y Minera, TEP 222 de la U. de Jaén, desde el 2004 hasta la actualidad.

### Diana Carolina Álvarez Rozo

Ingeniera Industrial egresada de la U. Francisco de Paula Santander y Magíster en Ingeniería Industrial de la U. de Pamplona. Integrante del grupo de investigación en Tecnología Cerámica GITEC, investigadora de Colciencias durante dos periodos y coautora de 5 artículos publicados en revistas indexadas.



ISBN 978-958-771-704-4



9 789587 717044