

**“MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL Y ENERGÉTICO DE LA  
VIVIENDA DE INTERÉS PRIORITARIO EN MEDELLÍN, A TRAVÉS DEL USO DE  
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN MODIFICADOS”**

**GLORIA CECILIA RESTREPO ZAPATA**

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA  
CORPORACIÓN ACADÉMICA AMBIENTAL  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES, SOSTENIBILIDAD  
MEDELLÍN  
2015

**“MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL Y ENERGÉTICO DE LA  
VIVIENDA DE INTERÉS PRIORITARIO EN MEDELLÍN, A TRAVÉS DEL USO DE  
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN MODIFICADOS”**

**GLORIA CECILIA RESTREPO ZAPATA**

**Tesis para optar al título de  
Maestría en Ciencias Ambientales**

**Asesor**

**Carlos Fernando Cadavid Restrepo  
Master en Planeación Ambiental**

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA**

**CORPORACIÓN ACADEMICA AMBIENTAL**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES, SOSTENIBILIDAD**  
**MEDELLÍN**  
**2015**

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

## **Agradecimiento**

A mis padres, por su apoyo incondicional y por tener siempre palabras de aliento y motivación para continuar el camino.

A mi asesor de tesis Carlos Fernando Cadavid Restrepo, por ser una persona con excelente calidad humana y técnica, quien con su “*responsabilidad compartida*” se convirtió en un soporte fundamental para desarrollar mi tesis.

A mis compañeros de maestría por su amistad, compañerismos y su compañía virtual para hacer mas agradables las extensas jornadas de estudio.

Al profesor Xavier Elias Castells, por compartir su conocimiento y experiencia.

A cada uno de mis compañeros del Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales, por su apoyo y soporte para el desarrollo de mi tesis.

A la Corporación Académica Ambiental de la Universidad de Antioquia por haberme permitido hacer parte de la 5ª cohorte de la Maestría en Ciencias Ambientales

## Tabla de contenido

<b>1. Contexto de la investigación .....</b>	<b>2</b>
1.1. Problema de Investigación .....	2
1.1.1. Planteamiento del Problema.....	2
1.1.2. Pregunta de Investigación .....	3
1.2. Hipótesis .....	4
1.3. Objetivos .....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos .....	4
1.4. Justificación.....	5
<b>2. Marco Teórico.....</b>	<b>7</b>
2.1. La vivienda de interés prioritario como satisfactor de necesidades.....	7
2.2. Dos dimensiones de la vivienda .....	8
2.3. Proceso de la vivienda social en Medellín y el Valle de Aburra.....	9
2.4. La vivienda de interés prioritario en el contexto de la construcción sostenible y los materiales sostenibles.....	12
2.5. Ladrillo tradicional y ladrillo ligero .....	16
2.6. El análisis de ciclo de vida como herramienta de evaluación del desempeño ambiental y energético de la vivienda de interés prioritario .....	19
2.7. Antecedentes del uso de materiales de construcción sostenibles en la vivienda social	22
2.7.1. México:.....	22
2.7.2. Brasil: .....	23
2.7.3. Chile:.....	24
<b>3. Ladrillo cerámico tradicional y propuestas de ladrillos cerámicos modificados .....</b>	<b>25</b>
3.1. Ladrillo cerámico tradicional .....	26
3.1.1. Ladrillo ordinario de construcción: .....	29
3.1.2. Ladrillos de ingeniería o vitrificados:.....	30
3.1.3. Ladrillos de construcción huecos.....	30
3.1.4. Ladrillos de fachada o enchape .....	31

3.2.	Ladrillos cerámicos modificados .....	31
3.2.1.	<i>Ladrillo cerámico tradicional cocido con combustible sólido recuperado.....</i>	<i>33</i>
3.2.2.	<i>Ladrillo cerámico con 7% de combustible sólido recuperado adicionado a la pasta cerámica en sustitución de arcilla y cocido con este mismo material.....</i>	<i>34</i>
3.2.3.	<i>Ladrillo cerámico con 7% de combustible sólido recuperado y 20% de cenizas volantes adicionadas a la pasta cerámica, en sustitución de arcilla, y cocido con combustible sólido recuperado.....</i>	<i>35</i>
<b>4.</b>	<b>Análisis del desempeño ambiental y energético de ladrillos cerámicos tradicionales y ladrillos modificados .....</b>	<b>35</b>
4.1.	Requerimientos energéticos en la producción de los ladrillos.....	36
4.1.1.	<i>Calor de calentamiento.....</i>	<i>37</i>
4.1.2.	<i>Calor de reacción .....</i>	<i>38</i>
4.1.3.	<i>Calor sensible de los humos.....</i>	<i>40</i>
4.1.4.	<i>Pérdida de calor a través de paredes .....</i>	<i>40</i>
4.2.	Análisis de ciclo de vida .....	41
4.2.1.	<i>Inventario del sistema analizado.....</i>	<i>43</i>
4.2.2.	<i>Impactos ambientales en el ciclo de vida de un ladrillo.....</i>	<i>71</i>
4.3.	Externalidades en el contexto de los ladrillos modificados.....	77
4.3.1.	<i>Disminución de emisiones de dióxido de carbono .....</i>	<i>79</i>
4.3.2.	<i>Disminución del consumo de arcilla.....</i>	<i>79</i>
4.3.3.	<i>Disminución del consumo de combustibles fósiles .....</i>	<i>80</i>
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>81</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>84</b>	
Anexo 1.	Calculos de los requerimientos energéticos en la producción de los ladrillos .....	84
Anexo 2.	Calculos externalidades .....	86
<b>6.</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>89</b>

## Lista de figuras

Figura 1. La vivienda de interés social desde mediados del siglo XX hasta la década de los 90's en el Valle de Aburrá .....	9
Figura 2. Urbanización Plaza Colón, un barrio para obreros fabriles y empleados..	10
Figura 3. Urbanización Aires de Paz, corregimiento San Antonio de Prado; proyecto de 110 viviendas que contó con el apoyo del FOVIMED .....	11
Figura 4. Ejemplos de ladrillo de perforación horizontal.....	17
Figura 5. Ejemplos de ladrillo de perforación vertical.....	18
Figura 6. Ejemplos de ladrillo macizo.....	18
Figura 7. Denominación de las caras y aristas de un ladrillo .....	27
Figura 8. Reacciones ocurridas en el proceso de cocción de la arcilla a temperaturas específicas. ....	39
Figura 9. Ubicación proyecto Tirol III, Megaproyecto Pajarito .....	42
Figura 10. Esquema básico del proceso de fabricación de ladrillos.....	44
Figura 11. Comparativo del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico tradicional con ladrillos cerámicos modificados a partir del uso de CSR en la pasta cerámica y/o como combustibles .....	73
Figura 12. Comparativo del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico tradicional cocido con carbón.....	74
Figura 13. Comparativo del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR .....	75
Figura 14. Comparativo del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico con 7% CSR y 20% cenizas volantes en la pasta cerámica y CSR como combustible .	76
Figura 15. Datos del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico con 7% CSR en la pasta cerámica y CSR como combustible .....	77

## Lista de tablas

Tabla 1 Matriz de evaluación de eficiencia energética .....	24
Tabla 2. Límites de la composición de las arcillas empleadas para la producción de ladrillos.....	26
Tabla 3. Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural .....	28
Tabla 4. Composición de la pasta para la producción de 1 tonelada de ladrillo cerámico cocido .....	28
Tabla 5. Especificaciones de ladrillos ordinarios .....	30
Tabla 6. Especificaciones de ladrillos de construcción huecos .....	31
Tabla 7. Composición de la pasta cerámica para la fabricación de ladrillo tradicional .....	33
Tabla 8. Composición de la pasta cerámica para la fabricación de ladrillo cerámico con 7% de CSR.....	34
Tabla 9. Composición de la pasta cerámica para la fabricación de ladrillo cerámico con 7% de CSR y 20% de cenizas volantes .....	35
Tabla 10. Cantidades de arcilla a cocer según el tipo de ladrillo cerámico.....	38
Tabla 11. Calores de calentamiento para cada tipo de ladrillo cerámico .....	38
Tabla 12. Calores de reacción para cada tipo de ladrillo cerámico.....	40
Tabla 13. Pérdidas de calor a través de paredes según tipo de ladrillo cerámico ....	41
Tabla 14. Balance energético y consumo de combustible (CSR) para cada tipo de ladrillo cerámico .....	41
Tabla 15 Unidad funcional para el ACV, según tipo de ladrillo cerámico .....	43
Tabla 16. Metano evitado por el uso de CSR en el proceso de fabricación de ladrillo cerámico como materia prima de la pasta cerámico y/o como combustible.....	45
Tabla 17. Datos de inventario para la etapa de extracción de arcilla – Ladrillo cerámico tradicional .....	47
Tabla 18. Datos de inventario para la etapa de extracción de arcilla – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible.....	47
Tabla 19. Datos de inventario para la etapa de extracción de arcilla – Ladrillo con	

CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica .....	48
Tabla 20. Datos de inventario para la etapa de extracción de arcilla – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica .....	48
Tabla 21. Datos de inventario para la etapa de maduración de la arcilla y trituración arcilla – Ladrillo cerámico tradicional .....	50
Tabla 22. Datos de inventario para la etapa de maduración de la arcilla y trituración arcilla – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible .....	50
Tabla 23. Datos de inventario para la etapa de maduración de la arcilla y trituración arcilla - Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica .	50
Tabla 24. Datos de inventario para la etapa de maduración de la arcilla y trituración arcilla - Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica.....	51
Tabla 25. Datos de inventario para la etapa de molienda – Ladrillo cerámico tradicional.....	52
Tabla 26. Datos de inventario para la etapa de molienda – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible .....	52
Tabla 27. Datos de inventario para la etapa de molienda - Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica .....	53
Tabla 28. Datos de inventario para la etapa de molienda -Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de ceniza volante en la pasta cerámica.....	53
Tabla 29. Datos de inventario para la etapa de amasado – Ladrillo cerámico tradicional.....	54
Tabla 30. Datos de inventario para la etapa de amasado - Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible .....	55
Tabla 31. Datos de inventario para la etapa de amasado - Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica .....	55
Tabla 32. Datos de inventario para la etapa de amasado - Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de ceniza volante en la pasta cerámica.....	55
Tabla 33. Datos de inventario para la etapa de moldeo – extrusión – Ladrillo	

cerámico tradicional .....	57
Tabla 34. Datos de inventario para la etapa de moldeo – extrusión - Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible.....	57
Tabla 35. Datos de inventario para la etapa de moldeo – extrusión – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámic .....	57
Tabla 36. Datos de inventario para la etapa de moldeo – extrusión – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica .....	58
Tabla 37. Datos de inventario para la etapa secado – Ladrillo cerámico tradicional	60
Tabla 38. Datos de inventario para la etapa secado – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible.....	60
Tabla 39. Datos de inventario para la etapa secado – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámic .....	61
Tabla 40. Datos de inventario para la etapa secado – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica .....	61
Tabla 41. Datos de inventario para la etapa de cocción – Ladrillo cerámico tradicional .....	64
Tabla 42. Datos de inventario para la etapa de cocción – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible.....	64
Tabla 43. Datos de inventario para la etapa de cocción – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámic .....	65
Tabla 44. Datos de inventario para la etapa de cocción – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica .....	65
Tabla 45. Datos de inventario para la etapa de almacenamiento – Ladrillo cerámico tradicional.....	66
Tabla 46. Datos de inventario para la etapa de almacenamiento – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible .....	67
Tabla 47. Datos de inventario para la etapa de almacenamiento – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámic.....	67
Tabla 48. Datos de inventario para la etapa de almacenamiento – Ladrillo con CSR	

como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica .....	67
Tabla 49. Datos de inventario para la etapa de distribución – Ladrillo cerámico tradicional.....	69
Tabla 50. Datos de inventario para la etapa de distribución – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible .....	69
Tabla 51. Datos de inventario para la etapa de distribución – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica .....	70
Tabla 52. Datos de inventario para la etapa de almacenamiento – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica .....	70
Tabla 53. Datos del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico tradicional con ladrillos cerámicos modificados a partir del uso de CSR en la pasta cerámica y/o como combustibles .....	72
Tabla 54. Datos del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico tradicional .....	73
Tabla 55. Datos del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR.....	74
Tabla 56. Datos del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico con 7% CSR y 20% cenizas volantes en la pasta cerámica y CSR como combustible .....	75
Tabla 57. Datos del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico con 7% CSR en la pasta cerámica y CSR como combustible.....	76
Tabla 58. Producción de ladrillos en la empresa base .....	78
Tabla 59. Emisiones de dióxido de carbono equivalente y costos evitados por cambio climático.....	79
Tabla 60. Ahorros por explotación y transporte de la arcilla extraída y por restauración de áreas de extracción de arcilla .....	80
Tabla 61. Ahorros asociados al consumo de carbón .....	80

## **Lista de ecuaciones**

Ecuación 1. Balance asociado a la energía térmica en la producción de ladrillos cerámicos.....	37
Ecuación 2. Calculo del calor de calentamiento.....	37
Ecuación 3. Calculo del calor de reacción.....	39

## Mejoramiento del desempeño ambiental y energético de la vivienda de interés prioritario en Medellín, a través del uso de materiales de construcción modificados

---

La vivienda es un satisfactor de necesidades, a través del cual se pueden atender funciones sociales, culturales, de seguridad, salud y bienestar de los individuos y sus familias, pero al cual muchos no pueden tener acceso por su alto costo; por lo que es responsabilidad de los gobiernos crear estrategias y políticas de construcción de viviendas para toda la población. En el caso de Colombia, el gobierno ha adoptado algunas leyes y decretos que promueven la construcción de viviendas de interés social y viviendas de interés prioritario, para las personas menos favorecidas de la sociedad, que cumplan con condiciones mínimas de habitabilidad y para las que se consideran algunos elementos mínimos de sostenibilidad en su construcción. Por lo tanto y considerando que tales elementos de sostenibilidad han sido desarrollados y adaptados de forma parcial por algunas entidades constructoras, ésta investigación busca establecer propuestas que permitan mejorar el desempeño ambiental y energético de la vivienda de interés prioritario en Medellín y describir algunos elementos del contexto de los materiales de construcción modificados empleados en el desarrollo de soluciones de vivienda de interés social, las consideraciones técnicas, los métodos a emplear y el presupuesto técnico requerido para desarrollar la siguiente pregunta de investigación: *¿Cuáles materiales de construcción aportan mayor eficiencia energética y mejoran el desempeño ambiental de la vivienda de interés prioritario de Medellín, a lo largo del ciclo de vida de ésta?*

**Palabras claves:** Ciclo de vida, construcción sostenible, eco-materiales, hábitat sostenible, modelación energética

## **1. Contexto de la investigación**

### **1.1. Problema de Investigación**

#### **1.1.1. Planteamiento del Problema**

Más que una necesidad, la vivienda constituye un satisfactor de necesidades (Banco Interamericano de Desarrollo [BID] 2007), ya que hace posible atender funciones vitales, sociales y culturales de las personas y sus familias, a la vez que proporciona abrigo, resguardo y reposo. Sin embargo, se caracteriza por presentar un alto costo al que familias o individuos de bajos ingresos económicos, enfrentados al desempleo o al subempleo, difícilmente tienen acceso, convirtiéndose en una responsabilidad de la sociedad (Comité Hábitat 2003). Para dar cumplimiento a tal responsabilidad, los gobiernos han adopta figuras que obligan e impulsan el desarrollo de proyectos de viviendas de bajo costo y que cumplen con condiciones básicas de habitabilidad, en las cuales se integran pocos o ningún concepto de sostenibilidad como eficiencia energética. (Parlamento Andino 2013).

En países de Hispanoamérica como México, Brasil, Chile y España se han realizado innumerables estudios en términos de las características que favorecen la eficiencia energética de las edificaciones, además se han desarrollado programas nacionales para promover la eficiencia energética a partir del uso de algunos materiales de construcción en la vivienda social (Bodach y Hamhaber 2010, Moreno 2010, Silva y Sposto 2012, y de Schiller et al. 2003).

En Colombia, el gobierno nacional, ha creado la figura de Vivienda de Interés Prioritario como medida para reducir el déficit habitacional y favorecer a la población de escasos recursos. Los lineamientos técnicos y habitacionales con los cuales deberán cumplir, mínimamente, tales viviendas han sido establecidos en decretos como el 0075 de enero de 2013 y en algunas guías técnica, las cuales aunque

tienen en cuenta elementos de eficiencia energética en el diseño arquitectónico de la vivienda, no hacen referencia al uso de materiales de construcción modificados para mejorar el desempeño energética de ésta (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial [MAVDT], 2011).

En Medellín, aunque la alcaldía y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá [AMVA] (S.F. y 2012) reconocen la necesidad de trabajar por la construcción y el mejoramiento de la vivienda social adoptando conceptos de sostenibilidad, el Instituto de Vivienda y Hábitat de Medellín, ISVIMED, sólo promueve la adopción de conceptos bioclimáticos en el diseño de sus proyectos, sin dar mayor importancia al uso de materiales de construcción modificados, al desarrollo investigaciones y a la adaptación de políticas o normas que promuevan el uso de estos materiales como una estrategia para mejorar la eficiencia energética de la VIP en la ciudad. Por tanto, este trabajo de investigación propone realizar un análisis, en términos de eficiencia energética, desempeño ambiental y costo - beneficio, de los materiales de construcción modificados que son empleados en países Hispanos y/o han sido desarrollados en Colombia y que cumplen con los elementos técnicos y normativos requeridos por el gobierno nacional, y proponer su incorporación en la construcción de la VIP en Medellín.

### ***1.1.2. Pregunta de Investigación***

Teniendo en cuenta lo anterior y que, según Badyina y Golubchikov, y United Nations Environmental Program, UNEP, (2012 y 2009), el consumo del 60% de la energía global generada y el 40% de los gases de efecto invernadero generados globalmente son atribuidos al sector de la edificación y la vivienda, y que es éste el sector que ofrece el mayor potencial de reducción de los gases de efecto invernadero en la mitigación del cambio climático sin generar costos económicos adicionales a través de la adopción de estrategias de eficiencia energética; surge la siguiente pregunta de investigación:

*¿Cuáles materiales de construcción aportan mayor eficiencia energética y mejoran el desempeño ambiental de la vivienda de interés prioritario de Medellín, a lo largo del ciclo de vida de ésta?*

## **1.2. Hipótesis**

Si el sector de la construcción, a lo largo de su ciclo de vida, presenta el mayor potencial de reducción de gases de efecto invernadero a través de la construcción de edificaciones sostenibles que incorporen acciones para reducir el consumo de energía y emplear materiales que generen impactos ambientales de menor significancia; y si existen evidencias de que el uso de materiales de construcción modificados mejoran la eficiencia energética y el desempeño ambiental de las edificaciones; **entonces**, el uso de ladrillos modificados y de paredes de materiales compuesto en la VIP de Medellín contribuyen con la eficiencia energética y el desempeño ambiental de esta.

## **1.3. Objetivos**

### ***1.3.1. Objetivo General***

Establecer propuestas para el mejoramiento del desempeño ambiental y energético de la vivienda de interés prioritario de Medellín, a través del uso de materiales de construcción modificados.

### ***1.3.2. Objetivos Específicos***

- Seleccionar materiales de construcción modificados que cumplan con los parámetros técnicos establecidos por la normatividad Colombiana y que presenten potencial de uso en la construcción de VIP en Medellín.

- Modelar el comportamiento energético de los materiales de construcción modificados que cumplan con los parámetros técnicos establecido por la normatividad Colombiana, en el contexto de la VIP en Medellín .
- Analizar impactos ambientales en el ciclo de vida de los materiales de construcción modificados que cumplan con los parámetros técnicos establecido por la normatividad Colombiana, en el contexto de la VIP en Medellín.
- Comparar los materiales de construcción modificados que cumplan con los parámetros técnicos establecido por la normatividad Colombiana, en el contexto de la VIP en Medellín.
- Identificar los materiales de construcción modificados que presentan un mejor desempeño energético y ambiental de la VIP de Medellín.

#### **1.4. Justificación**

A partir de la introducción del concepto de desarrollo sostenible en 1987, instituciones como la ONU, han trabajado en el establecimiento de criterios de sostenibilidad que garanticen el acceso a elementos como la vivienda, los servicios y la energía, esenciales para el desarrollo de la vida humana (Ponce-de León 2002). Tales elementos han tomado mayor importancia dado el potencial que presentan como estrategia de disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero globales a un muy bajo costo, a partir de la adopción de estrategias de construcción sostenible que mejoren su desempeño energético y ambiental (Badyina y Golubchikov, y UNEP 2012 y 2009).

Como consecuencia de lo anterior, países Hispanoamericanos como México, Brasil, Chile y España, han creado e implementado políticas nacionales que promueven el desarrollo de proyectos de vivienda social sostenible en los que se promueve el uso de eco-materiales de construcción que causen impactos negativos menos significantes en el medio ambiente y que contribuyen con el mejoramiento de las condiciones de habitabilidad de las mismas mientras ahorran energía y disminuyen la generación de gases de efecto invernadero.

Sin embargo en el contexto de Medellín, la política municipal de construcción de VIP no fomenta el uso de materiales de construcción modificados que permitan mejorar el desempeño energético y ambiental de la vivienda, a esto se le suma lo expuesto por instituciones como ISVIMED (2014a) que sostiene que los proyectos de eficiencia energética en soluciones de vivienda social, hasta ahora desarrollados, no han tenido un impacto significativo en el sector de la construcción de la región.

Por tanto, esta propuesta de investigación brinda la oportunidad de proponer el uso de algunos materiales de construcción modificados, que cumplan con los requerimientos técnicos expuestos por la normatividad colombiana, y mejoren el desempeño ambiental y energético de la VIP de Medellín a lo largo de su ciclo de vida. Los resultados de esta investigación podrán convertirse en un marco de referencia para el desarrollo de políticas que promuevan el mejoramiento de las condiciones de construcción de la VIP y contribuirán con la minimización de impactos ambientales asociados al sector de la construcción, tales como la generación de gases de efecto invernadero, la generación de residuos reciclables y el consumo de energía asociado a los procesos de extracción, fabricación, transporte, uso y disposición final de los materiales de construcción

## **2. Marco Teórico**

### **2.1. La vivienda de interés prioritario como satisfactor de necesidades**

La vivienda es un elemento fundamental del derecho a la vida digna “en la medida en que habitar significa disponer de un lugar para vivir” (Comité de Habitat, 2003) lo cual hace que más que una necesidad, ésta constituya un satisfactor de necesidades ya que hace posible atender funciones vitales, sociales y culturales de las personas y sus familias, a la vez que proporciona abrigo, resguardo y reposo (Solís San Vicente, 2005). En otras palabras, significa la posibilidad de tener un lugar que pueda ser usado como habitación, con espacio suficiente para vivir, que permita el aislamiento del entorno, que cuente con una infraestructura y servicios básicos adecuados y con una ubicación que facilite el acceso a los sitios de trabajo, facilita de este modo el desarrollo de las personas y sus familias, además de cumplir con funciones sociales, culturales y vitales derivadas del derecho a la vida (Comité de Habitat, 2003). Sin embargo, una de las principales características de la vivienda es su alto costo al que familias o individuos de bajos ingresos económicos, enfrentados al desempleo o al subempleo, difícilmente tienen acceso, convirtiéndose en una responsabilidad de la sociedad. Para dar cumplimiento a tal responsabilidad, los gobiernos han adopta figuras que obligan e impulsan el desarrollo de proyectos de viviendas de bajo costo y que cumplen con condiciones básicas de habitabilidad, en las cuales se integran pocos o ningún concepto de sostenibilidad como eficiencia energética (Parlamento Andino, 2013).

En Colombia, el gobierno nacional, ha creado dos figuras de vivienda social como medida para reducir el déficit habitacional y favorecer a la población de escasos recursos: Vivienda de Interés Social (VIS) y Vivienda de Interés Prioritario (VIP). Los lineamientos técnicos y habitacionales con los cuales deberán cumplir, mínimamente, tales viviendas han sido establecidos en decretos como el 0075 de enero de 2013 y en algunas guías técnica de construcción (Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2011). Tal decreto, en el artículo 1º, define la VIS

como “unidad habitacional que cumple con los estándares de calidad en diseño urbanístico, arquitectónico y de construcción y cuyo valor no exceda ciento treinta y cinco salarios mínimos mensuales legales vigentes (135 SMLMV)”; y VIP como la “vivienda cuyo valor máximo será de setenta salarios mínimos legales mensuales vigentes (70 SMLMV)”. En este mismo artículo se establece que los municipios de categoría 3, 4, 5 y 6 de la Ley 617 de 2000, sólo podrán financiar VIP (Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, 2013).

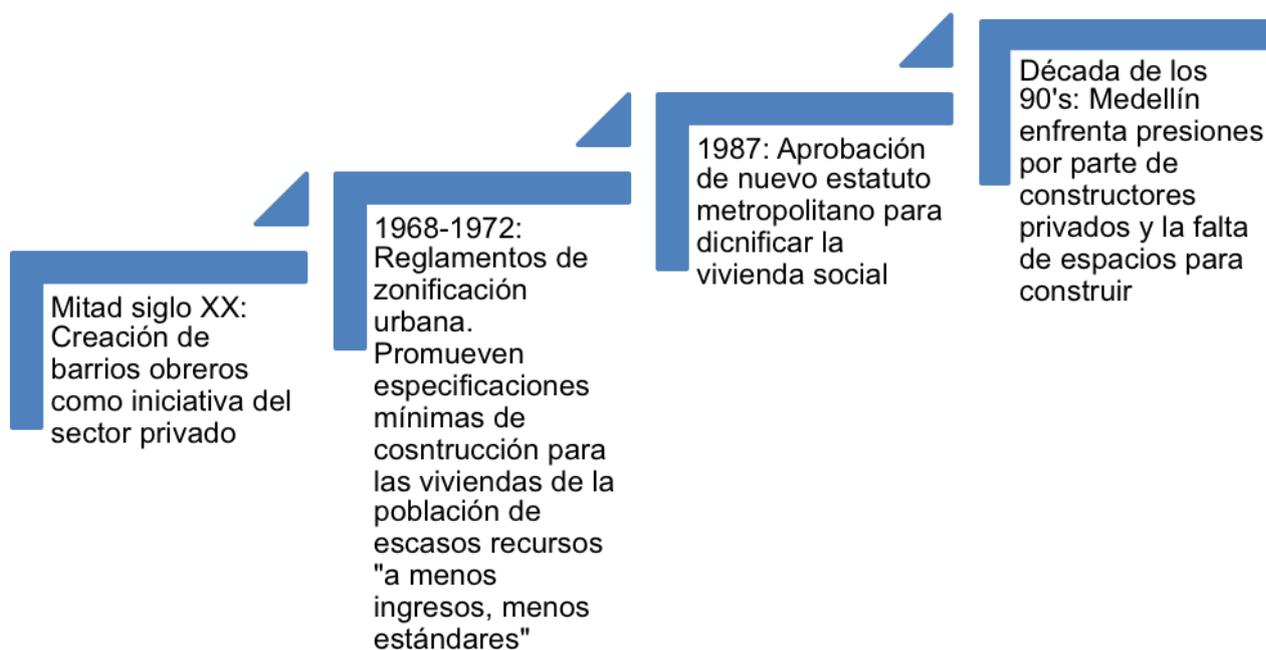
## **2.2. Dos dimensiones de la vivienda**

El término vivienda está integrado por dos dimensiones: interioridad o casa y exterioridad o entorno. En el primero se tienen en cuenta atributos estructurales como las paredes, los techos, los pisos y los acabados; mientras que el segundo hace referencia a su ubicación en el contexto local, léase barrio, comuna o vereda (Comité de Habitat, 2003). En otras palabras, “La vivienda es parte de la relación entre la sociedad y el medio ambiente” (Hannula, 2012). Desde lo social, la vivienda debe contar con servicios que garanticen la seguridad, la comodidad, la salud y la nutrición de sus habitantes (Comité de Habitat, 2003). (Instituto Social de Vivienda y Hábitat de Medellín, 2014a)

En el contexto medio ambiental, la vivienda presenta dos condiciones, que de alguna manera se contraponen, de un lado se generan impactos significativos asociados a la extracción y el consumo de recursos, la generación de residuos y contaminación del agua y el aire a lo largo de su ciclo de vida (Hannula, 2012). Mientras que, según el departamento de Sustainable Buildings & Climate Change (2009), la adopción de estrategias sostenibles ambiental y energéticamente hacen de este sector un elemento clave en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

### 2.3. Proceso de la vivienda social en Medellín y el Valle de Aburrá

Desde mediados del siglo XX hasta la década de los 90's, la construcción de vivienda de interés social en el Valle de Aburrá se ha estado sujeta a diferentes procesos sociales y políticos, como se muestra en la Figura 1:



**Figura 1. La vivienda de interés social desde mediados del siglo XX hasta la década de los 90's en el Valle de Aburrá**

Fuente: (INURBE, 1996)



**Figura 2. Urbanización Plaza Colón, un barrio para obreros fabriles y empleados**  
**Fuente:** (INURBE, 1996)

A partir de 2004, los planes de desarrollo del municipio han considerado el tema de la vivienda social como un elemento que debe integrar el espacio público, la movilidad y el medio ambiente; y se crea la Secretaría de Desarrollo Social y el Fondo de Vivienda de Interés Social de Medellín – FOVIMED (Vélez González, 2012). Tales acciones permitieron el otorgamiento de subsidios de vivienda a personas de bajos recursos, dando origen a una intervención histórica al construirse alrededor de 20 mil soluciones habitacionales (Vélez González, 2012). El tema toma tal relevancia que se crea la necesidad de crear una institución que permita cohesionar todos los procesos de vivienda social desde una política pública clara, dando origen al Instituto Social de Vivienda y Hábitat de Medellín – ISVIMED.



**Figura 3. Urbanización Aires de Paz, corregimiento San Antonio de Prado; proyecto de 110 viviendas que contó con el apoyo del FOVIMED**  
**Fuente:** (Vélez González, 2012)

ISVIMED, creado por el gobierno municipal en 2008, es el organismo encargado de gerenciar la vivienda social del municipio, de modo que se dé solución a las necesidades habitacionales; especialmente de los asentamientos humanos y de la población menos favorecida (Instituto Social de Vivienda y Hábitat de Medellín, 2014). De igual manera, el tema de vivienda en la ciudad es considerado en el Plan de Desarrollo 2012-2015, componente 5 de la Línea 2, y cuenta con una ruta de desarrollo, el Plan Estratégico Habitacional de Medellín - PEHMED 2020 (Alcaldía de Medellín, 2012 & Instituto Social de Vivienda y Hábitat de Medellín, 2014).

El PEHMED 2020 establece que de las 692.384 viviendas que constituyen el parque habitacional de Medellín, el 48% (509.190 unidades de vivienda) pertenecen a los estratos socioeconómicos 1 y 2; adicionalmente establece que según el Censo del 2005, a ese año la ciudad contaba con un déficit habitacional del 14% (84.725 unidades de vivienda); de los cuales el 6,73% (40.722 unidades de vivienda) hacían parte del déficit cuantitativo y el restante 7,27% (44.003 unidades habitacionales) en déficit cualitativo (Alcaldía de Medellín, 2012). Tales datos, sumados a los programas de VIP desarrollados por el Instituto Social de Vivienda y Hábitat de

Medellín (2014a), durante el período 2008-2010, donde 7.381 viviendas fueron construidas, demuestran que aunque el gobierno municipal ha venido desarrollando importantes esfuerzos para identificar y subsanar la problemática del déficit habitacional de la ciudad, este es un tema que requiere especial atención por parte del gobierno municipal.

#### **2.4. La vivienda de interés prioritario en el contexto de la construcción sostenible y los materiales sostenibles**

Durante mucho tiempo, los procesos de construcción de la vivienda habían estado enfocados en garantizar una buena calidad de la edificación y en el control de los costos asociado a ésta (Alavedra, Domínguez, Gonzalo, & Serna , 1997). Sin embargo, el creciente interés por la protección del medio ambiente y la adopción de elementos que promuevan el desarrollo sostenible han causado impactos en las formas de construcción de la vivienda, dando paso al concepto de construcción sostenible; y el cual ha sido desarrollado por diferentes autores, quienes precisan que son muchos los elementos y factores que se deben tener en cuenta para que una construcción sea sostenible:

(...) implica que el desempeño de dichas edificaciones sea eficiente en términos de consumo de energía y agua, que se proteja el medio ambiente en que se están siendo construidas, se minimice el desperdicio de materiales durante la construcción, se aproveche la infraestructura de ciudades existentes, y se minimice el uso de transporte privado, entre otras estrategias. Como parte complementaria del diseño y la construcción de edificaciones sostenibles, es necesario considerar el impacto ambiental causado por la extracción y los procesos de producción de los materiales que se utilizan en la construcción. (Rocha Tamayo, 2011, p 101)

Dando origen a definiciones de construcción sostenible como la adoptada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el Documento Técnico de Base para la Elaboración de una Política Pública de Construcción Sostenible para el Valle de

Aburrá:

(...)el proceso completo de actividad constructiva que tiene como resultado productos urbanos eficientes y respetuosos del equilibrio entre los tres pilares básicos de la sostenibilidad; este proceso requiere un análisis complejo de las variables que puedan afectar dicho equilibrio a lo largo de todo el ciclo de vida del producto urbano construido. (Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, 2010, p.14)

La aplicación del concepto de construcción sostenible en viviendas, promueve necesariamente el uso de materiales que minimicen los impactos ambientales, ecológicos, sociales, económicos y tecnológicos negativos causados por los procesos de fabricación, uso y disposición final de estos; mientras cumplen con las funciones de los materiales de construcción convencionales (Bancrofft, 1998). Tales materiales son conocidos con el nombre de materiales sostenibles y se caracterizan por usar materiales que cumplan los siguientes criterios (Rocha Tamayo, 2011):

- *Materiales locales*: la extracción de materias primas y los procesos de producción se desarrolle a distancias cortas del sitio de construcción. Esto minimizará la generación de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) asociada al transporte de materiales.
- *Materiales renovables*: en su uso se debe tener en cuenta la producción, de modo que se garantice la continuidad de la renovación, evitando el agotamiento del suelo y de los recursos hídricos.
- *Reciclaje de materiales*: al reciclar se elimina el impacto ambiental causado por los procesos de extracción y minería, se minimiza el consumo de energía y de materias primas como el petróleo, mientras se minimizan las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de los materiales y de su transporte.
- *Materiales reutilizables*: incluir prácticas de diseño para el desmantelamiento, que facilite la reutilización de los componentes y materiales.
- *Materiales durables*: uno de los aspectos más importantes para lograr

construcciones sostenibles es una vida útil prolongada.

- *Materiales de fácil mantenimiento*: el uso de este tipo de materiales permitirá minimizar los impactos ambientales asociados al mantenimiento de las edificaciones durante su vida útil.
- *Características térmicas*: el diseño arquitectónico y el uso de materiales que corresponda a las condiciones climatológicas del sitio de construcción favorecerá las condiciones de confort térmico de los ambientes interiores de las construcciones sin requerir el uso de equipos o sistemas activos que redundan en altos consumos energéticos.
- *Energía embebida en los materiales*: también conocida como energía gris es la energía requerida en la producción (extracción de materias primas, procesos de transformación) y el transporte de los materiales de construcción hasta los sitios de uso. Es el parámetro más utilizado para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- *Contaminación de ecosistemas*: al igual que el consumo de energía y sus consecuentes emisiones, la contaminación de fuentes hídricas, la deforestación, la erosión y otros daños ecológicos son de igual relevancia para la selección de los materiales de construcción.
- *Efecto isla de calor*: es el aumento de la temperatura en las ciudades con relación a su entorno rural próximo, debido a la acumulación de calor generado por la radiación solar de las superficies construidas. Por lo que es preciso preferir materiales que posean valores de SRI (Solar Reflectance Index) mayores a 29, de modo que se tengan menores aumentos de temperatura en las superficies de las edificaciones.

En el contexto nacional, el tema de vivienda sostenible ha venido tomando mayor importancia durante los últimos años. En el caso específico de la vivienda de interés prioritario, la política nacional de vivienda de interés social aborda el tema de sostenibilidad y eficiencia energética de manera indirecta, a través de lineamientos de construcción como los que establece el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2011), hoy Ministerio de Vivienda, en la Serie Guías de

Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social – Calidad en la Vivienda de Interés Social, las cuales plantean el uso eficiente de los recursos naturales como un requerimiento para desarrollar programas de soluciones habitacionales de VIP.

En el caso específico de la VIP de Medellín, aunque la administración municipal y el (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2012) a través del PEHMED 2020 y el Plan de Gestión Pura Vida, respectivamente, han establecido la necesidad de trabajar por la construcción y el mejoramiento de la vivienda social adoptando conceptos de sostenibilidad; el organismo responsable de gestionar la VIP de la ciudad, ISVIMED, no ha desarrollado estrategias que promuevan el uso de materiales modificados o eco-materiales; a 2014 sólo se promueve la adopción de criterios de arquitectura bioclimática, así lo demuestra la respuesta dada al por parte de esta institución sobre el derecho de petición con radicado S 6821 del 22 de abril de 2014:

(...) unos criterios mínimos para construcción de Vivienda de interés prioritario (VIP) que están asociados a la arquitectura Bioclimática, estos criterios incluyen ventilación e iluminación natural, para esto, se desarrolló un manual básico que es entregado a cada uno de los constructores para tener en cuenta a la hora de realizar el diseño (Instituto Social de Vivienda y Hábitat de Medellín, 2014a).

De acuerdo a algunos estudios desarrollados por instituciones como el Banco de la República Colombia y el Programa para el Medio Ambiente de las Naciones Unidas, PNUMA, en Pernet (2011), el uso de recursos pétreos en la industria de la construcción en América Latina ha crecido considerablemente, consolidándose como uno de los materiales más empleados durante los procesos de construcción y acabado de las obras. Estudios desarrollados por Elias (2013), quien toma como referencia la construcción de un apartamento de 80m<sup>2</sup>, construido en un edificio de 12 apartamentos, con su respectivo parqueadero y ubicado en España, establecen que los materiales cerámicos y el vidrio constituyen el 93,3% del total de los materiales que son empleados en su construcción, siendo el ladrillo el tercer

material más importante dentro de esta clasificación, con un 9,09%, precedido por el hormigón (64,22%) y los aglomerados (14,59%). Lo anterior demuestra la pertinencia de enfocar este trabajo de investigación al mejoramiento del desempeño energético y ambiental de los ladrillos empleados en la construcción de la VIP de Medellín.

## **2.5. Ladrillo tradicional y ladrillo ligero**

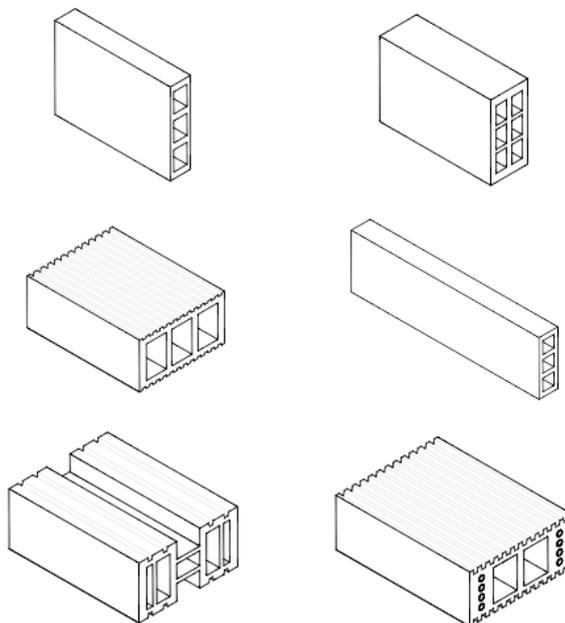
El ladrillo constituye uno de los materiales de construcción más empleados a lo largo de la historia, su uso facilita el cerramiento, la protección y el aislamiento térmico y acústico de las construcciones (De Hoz Onrubia, Maldonado Ramos, & Vela Cossio, 2003). Como material de construcción, el ladrillo puede describirse como un pieza paralelepípeda, generalmente en forma de ortoedro que requiere de procesos de moldeo, secado y cocción de arcillas o tierras arcillosas, caracterizados por presentar un alto consumo de recursos y energía, causando impactos significativos en el medio ambiente (Mingarro Martín, 1996).

Los ladrillos cerámicos, también llamados unidades de mampostería de arcilla cocida, se pueden clasificar en estructurales, no estructurales y de fachada (Instituto Colombiana de Normas Técnicas - ICONTEC, 2009). Para efectos de este trabajo de investigación, se consideraran los ladrillos no estructurales.

Para el caso de Colombia, la NTC 4205-2 (ICONTEC, 2009a) establece que existen tres tipos básicos de ladrillos cerámicos, según la ubicación de sus perforaciones y el volumen que estas ocupen:

- *Ladrillo de perforación horizontal (PH)*: unidad cuyas celdas o perforaciones son paralelas a la cara o superficie en que se asientan en el muro. El porcentaje máximo de huecos o perforaciones es del 75% de la sección bruta

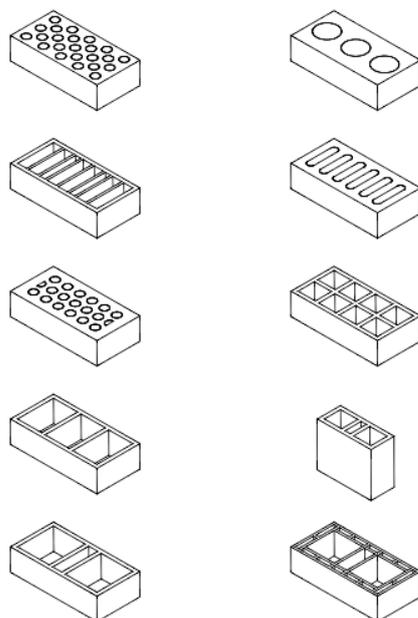
que contiene. La Figura 4 presenta algunos ejemplos de ladrillos de perforación horizontal.



**Figura 4. Ejemplos de ladrillo de perforación horizontal**

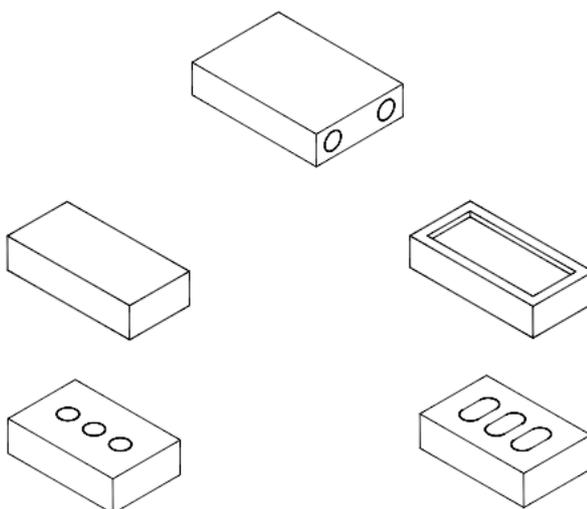
Fuente: NTC 4205-2 (ICONTEC, 2009a)

- **Ladrillo de perforación vertical (PV):** unidad cuyas celdas o perforaciones son perpendiculares a la cara o superficie en que se asientan en el muro. El área de las celdas y perforaciones no puede ser superior al 75% del área bruta de dicha sección. Ver Figura 5.



**Figura 5. Ejemplos de ladrillo de perforación vertical**  
**Fuente:** NTC 4205-2 (ICONTEC, 2009a)

- Ladrillo macizo (M): son ladrillos sin perforaciones o cuyas perforaciones son menores al 25% del volumen total de la unidad. Ver Figura 6.



**Figura 6. Ejemplos de ladrillo macizo**  
**Fuente:** NTC 4205-2 (ICONTEC, 2009a)

Aunque el uso de arcilla, agua y calor continúan siendo las principales materias primas en la fabricación de ladrillo, se han desarrollado investigaciones que han incorporado nuevos materiales, a partir de los cuales se ha mejorado la eficiencia energética y el desempeño ambiental de éste, dando origen al ladrillo ligero (Elias, 2009). La noción de ligereza tiene una directa relación con el aislamiento térmico de las viviendas y edificaciones y constituye una oportunidad para disponer y aprovechar residuos y disminuir los consumos de energía asociados a los procesos de fabricación de los ladrillos y el uso de la vivienda a lo largo de su ciclo de vida (Elias, 2009).

## **2.6. El análisis de ciclo de vida como herramienta de evaluación del desempeño ambiental y energético de la vivienda de interés prioritario**

La adopción de estrategias de sostenibilidad en el sector de la construcción ha llevado al desarrollo de diferentes sistemas que no sólo permiten diseñar y construir edificaciones con un mejor desempeño ambiental y energético, sino que permiten monitorear y evaluar dichas variables durante las etapas de operación y demolición de la misma. Es así como aparecen software de modelación energética como Ecotec y Design Builder, cuyos proveedores son Autodesk y Design Builder Co respectivamente (Bobadilla, Bustamante, García Alvarado, González, & Muñoz, 2014), y metodologías como las propuestas por sistemas de certificación de construcción sostenible y/o el análisis de ciclo de vida como LEED (Leadership in Energy and Environment Design [Liderazgo en Energía y Diseño del Medio Ambiente]) administrado por el Green Building Council (Consejo de Edificios Ecológicos) de los Estados Unidos (UAGBC, 2012).

La modelación energética consiste en determinar el grado de eficiencia de una edificación determinada, en comparación con otra edificación con características similares pero sin características de sostenibilidad o eficiencia; convirtiéndose en

una herramienta a través de la cual se pueden identificar elementos a mejorar para obtener un mejor desempeño energético y ambiental de esta (Setri Sustentabilidad SAS, 2010). La modelación se basa en un sistema de simulación que tiene en cuenta parámetros y variables climáticas, tiempos y horarios de ocupación, materiales empleados en la envolvente de la edificación, ventanas y los sistemas de calefacción, aire acondicionado, iluminación y agua caliente con los que esta cuenta.

A nivel mundial diferentes organizaciones y/o gobiernos, han propuesto, a través de programas para diseñar, construir y operar construcciones sostenibles, metodologías que permiten mejorar el desempeño ambiental y energético de la construcción. Es el caso del BRE (Building Research Establishment) que es una iniciativa del gobierno británico para impulsar acciones hacia la industria del gobierno de la Commonwealth; GREENBUILDING iniciativa de la Comisión Europea; PASSIVEHAUS desarrollado por la Universidad alemana de Darmstadt para controlar exteriores y ventilación de las edificaciones; iISBE (international initiative for a Sustainable Built Environment) organización internacional que promueve la adopción de políticas, métodos y herramientas para la promoción de edificaciones sostenibles; LEED que es quizás el sistema más completo y reconocido internacionalmente por integrar estrategias sostenibles que superan ampliamente estándares internacionales (Consejo Construcción Verde España, 2011).

Por su parte el análisis de ciclo de vida – ACV es una herramienta metodológica reglamentada por la norma ISO 14040, que sirve para medir el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida (desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida). Se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener unos resultados que muestren sus impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de los mismos (IHOBE Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2009).

La principal característica de esta herramienta es su enfoque holístico, es decir que se basa en la idea de que todas las propiedades de un sistema no pueden ser determinadas o explicadas solo de manera individual por las partes que lo componen. Es necesaria la integración total de todos los aspectos que participa; de ahí el concepto de tener en cuenta todo el ciclo de vida del sistema (IHOBE Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2009).

El ACV tiene en cuenta los elementos de entrada (inputs) y los elementos de salida (outputs). El primero mide y analiza el uso de recursos y materias primas, partes y productos, transporte, energía y otros requerimientos que se tienen en cuenta en cada proceso o fase del sistema. Por su parte los outputs están relacionados con las emisiones al aire, al agua y al suelo, así como los residuos y los subproductos que se generan en cada proceso o fase del sistema (IHOBE Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2009).

Dentro del ACV, los impactos ambientales se agrupan en diferentes categorías, dependiendo del objetivo de estudio y de la exactitud de los resultados requeridos. Algunas de las principales categorías de impactos ambientales son calentamiento global, consumo de recursos energéticos y consumo de materias primas (IHOBE Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2009).

El sector de la construcción genera impactos significativos en términos de consumo de energía, consumo de recursos y generación de emisiones. Según Aranda Usón, Díaz de Garayo, Scarpellini, & Zabalza Bribián (2014) la fabricación de los materiales de construcción requeridos para construir un metro cuadrado de una edificación estándar puede suponer la inversión de una cantidad de energía equivalente a la producida por la combustión de más de 150 litros de gasolina. Cada metro cuadrado construido conllevaría una emisión media de 0,5 toneladas de dióxido de carbono y un consumo energético de 1.600 kWh. Por tanto, el uso del

ACV como herramienta de evaluación de la vivienda permite conocer y comparar el desempeño ambiental y energético de esta en cada una de las fases de su ciclo de vida, sin centrarse en una específica y más bien facilitando la toma de decisiones en la que se tiene en cuenta la vivienda como un sistema integrado (FADECO Promotores, 2008).

## **2.7. Antecedentes del uso de materiales de construcción sostenibles en la vivienda social**

En el contexto internacional, el tema de desempeño ambiental y energético en vivienda social ha sido abordado en respuesta a la necesidad de disminuir el déficit habitacional de algunos países y al potencial de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que presentan las edificaciones. En América Latina, algunos de los países que más avances presentan en términos de la promoción de políticas de construcción de vivienda social sostenible son México, Brasil y Chile.

### **2.7.1. México:**

El gobierno federal ha impulsado y liderado programas que reconocen la vivienda como un elemento básico para el desarrollo sustentable de este país, señalándolo como un “*sector clave para reducir las emisiones de efecto invernadero causantes del calentamiento global*” (Moreno, 2010). La política nacional reconoce a la vivienda sostenible como un elemento que además de contribuir con el desarrollo económico, contribuye con el mejoramiento del ambiente interno y por tanto de la salud de sus habitantes, y la conservación del medio ambiente (Moreno, 2010). Desde 2006, a partir de la Ley de Vivienda, se establecen disposiciones para promover una vivienda de interés social digna, que respete el medio ambiente y use los recursos naturales de manera eficiente; se desarrollan instrumentos jurídicos e incentivos financieros y tributarios para incentivar el uso de tecnologías y diseños sostenibles en la construcción de vivienda que minimicen los consumos de energía

y agua; y se ha apoyado el desarrollo de proyectos pilotos en diferentes regiones del país (Moreno, 2010). El desarrollo de las políticas nacionales en torno a la vivienda sostenible, ha promovido y fortalecido la investigación académica, institucional y empresarial en torno al tema y a otros temas asociados (De Buen, 2012), Un ejemplo de estas iniciativas de investigación es el desarrollado por Moreno (2010) en el cual se realiza una descripción y análisis de los elementos tecnológicos, en materia de la vivienda sostenible, propuestos y/o regulados por el gobierno Mexicano, tales como: calentamiento de agua, iluminación, uso de materiales modificados en el recubrimiento de la vivienda, energía eléctrica alternativa, aire acondicionado y ahorro de agua.

### **2.7.2. Brasil:**

En 1996 se dio inicio al programa “Mi casa mi vida” (Programa Minha Casa Miha vida), el cual impulsa la construcción de tres millones de viviendas sociales, para familias con ingresos iguales o inferiores a los 1200 euros por mes, durante el periodo 2008-2014 (Silva & Sposto, 2010). Este proyecto ha fomentado el desarrollo de iniciativas de investigación a partir del análisis del ciclo de vida de la edificación, de los cuales autores como Silva & Sposto (2010) han demostrado *“(...)que la durabilidad de los sistemas es muy importante a través del mantenimiento. Esto significa que la calidad de los materiales de construcción es un factor predominante en el consumo de energía”*. Bodach & Hamhaber (2010) presentan la Matriz de Evaluación de Eficiencia Energética como una estrategia que permite evaluar la sostenibilidad de la vivienda social de este país en términos de la eficiencia energética. Esta estrategia se encuentra dividida en tres áreas principales: planeación del sitio, confort térmico y visual, e instalación, y se adiciona además otra área de eco-eficiencia para considerar el consumo de otros (Bodach & Hamhaber, 2010)

**Tabla 1 Matriz de evaluación de eficiencia energética**

	<b>Estrategia</b>
<b>Planeación del sitio</b>	Reducción del efecto de isla de calor Sombra en fachada de la edificación Mejorar la ventilación Urbana
<b>Confort térmico y visual</b>	Mejorar la eficiencia termal de la edificación Recubrimiento Mejorar ventilación natural Asegurar iluminación natural Reducir radiación solar directa
<b>Equipos</b>	Uso de calentadores solares de agua Reducir demanda de electricidad por electrodomésticos Reducir demanda de electricidad por iluminación natural
<b>Eco-eficiencia</b>	Reducir impactos ambientales por uso del suelo Reducir consumo de agua Reducir impactos ambientales por materiales de construcción Reducir la necesidad de transporte

**Fuente:** Bodach & Hamhaber (2010)

### **2.7.3. Chile:**

Se han realizado estudios pioneros que han tenido la participación diferentes actores de los sectores privado y público; se destaca la participación de la Cámara Chilena de la Construcción, CChC, en programas como la construcción limpia y sustentable en 1999; el establecimiento de una empresa para la gestión de residuos de la construcción, REGEMAC; la constitución del Consejo Chileno de la Construcción Sustentable y el desarrollo de guías para la arquitectura geoambiental (De Schiller, Gomez , Goijberg, & Treviño, 2003)

### **3. Ladrillo cerámico tradicional y propuestas de ladrillos cerámicos modificados**

Los productos cerámicos son “objetos moldeados con materias primas naturales plásticas y endurecidos permanentemente por el calor” (Galán & Aparicio, S.F). La fabricación de materiales cerámicos, como el ladrillo y la teja emplea materias primas naturales con características plásticas, esencialmente arcillas, o no plásticas, también llamadas desgrasantes y cuya principal propiedad es la reducción de la plasticidad a fin de permitir la trabajabilidad del material y facilitar el proceso de secado (Galán & Aparicio, S.F).

La arcilla es la principal materia prima para la fabricación de productos cerámicos; la cual se trata de una roca procedente de la desintegración, principalmente por acción de agentes atmosféricos, de otras rocas formadas básicamente por materiales arcillosos que químicamente son silicatos de aluminio hidratados (Villarino Otero, S.F). Para el caso de la fabricación de ladrillos, se emplean arcilla calcáreas con un contenido de carbonato de calcio ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) inferior al 30%, ferruginosas y poco grasas para evitar deformaciones o roturas durante el secado y la cocción; la Tabla 2 presenta la composición de las arcillas utilizadas para la producción de ladrillos (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F).

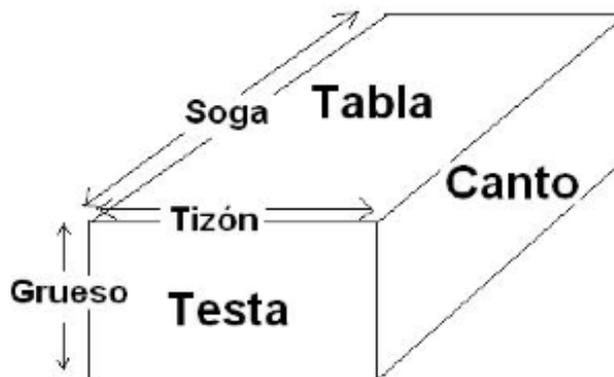
**Tabla 2. Límites de la composición de las arcillas empleadas para la producción de ladrillos**

<b>Composición</b>	<b>Límites</b>
<b>Óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>)</b>	43 – 61 %
<b>Óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	26 – 39 %
<b>Óxido de magnesio (MgO)</b>	0 – 1,5 %
<b>Óxido de calcio (CaO)</b>	0 – 1 %
<b>Óxido de hierro (III) (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	0 – 2,5 %
<b>Óxido de sodio + óxido de potasio (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)</b>	0 – 2,5 %
<b>Sulfatos</b>	0 – 2 %

**Fuente:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander (S.F)

### **3.1. Ladrillo cerámico tradicional**

Los ladrillos son piedras artificiales, generalmente de forma octaédrica (Figura 7) obtenidas a partir del moldeamiento y la cocción de arcillas de composición adecuada, que se utiliza para la construcción (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F; Villarino Otero, S.F). Las principales propiedades con las que deben cumplir los ladrillos son la resistencia mecánica a la compresión y resistencia a la intemperie y a los cambios de temperatura, homogeneidad, bajo peso y porosidad moderada (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F).



**Figura 7. Denominación de las caras y aristas de un ladrillo**

Fuente: Villarino Otero (S.F)

Los ladrillos tradicionales son fabricados con arcillas moderadamente arenosas y magras, dado que el uso de arcillas muy plásticas incrementan la ocurrencia de grietas y deformaciones en estos; según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y la Universidad Industrial de Santander (S.F), los ladrillos tradicionales deben cumplir, mínimamente, con las siguientes condiciones:

- Presentar una resistencia a la presión de que oscile entre 1.500 Lb/pulg<sup>2</sup> (105 kg/cm<sup>2</sup>) y 7.000 Lb/pulg<sup>2</sup> (492 kg/cm<sup>2</sup>) y una absorción de agua igual o mayor al 8%<sup>1</sup>.
- Ser cocidos a temperaturas lo suficientemente elevadas; de este modo se garantizará el cumplimiento de resistencia mecánica requerida y se mejorará la resistencia a las condiciones atmosféricas.
- No estar completamente vitrificados a fin de obtener un grado de porosidad adecuado, que además contribuya con el mejoramiento de las propiedades de aislamiento térmico del ladrillo.

En el caso de Colombia, la NTC 4205-2 del ICONTEC (2009a) establece que las unidades de mampostería no estructural deben cumplir con una resistencia mínima

---

<sup>1</sup> Es de anotar que aunque en Colombia existe norma técnica NTC 4205-1 (ICONTEC, 2009), que establece que los ladrillos estructurales deben cumplir con una resistencia a la presión de entre 35 y 200 kg/m<sup>2</sup>, según el tipo de ladrillo, en esta investigación se emplearán los datos de la investigación desarrollada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y la Universidad Industrial de Santander (S.F)

a la compresión y unos porcentajes máximos de absorción de agua, como se muestra en la

**Tabla 3. Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural**

Tipo	Resistencia mínima a la compresión MPa (kgf/cm <sup>2</sup> )		Absorción de agua máxima en %	
	Prom 5 unidades	Unidad	Interior	
			Prom 5 unidades	Unidad
<b>PH</b>	3,0 (30)	2,0 (20)	17	20
<b>PV</b>	14,0 (140)	10,0 (100)	17	20
<b>M</b>	14,0 (140)	10,0 (100)	17	20

**Fuente:** NTC 4205-2 del ICONTEC (2009a)

De acuerdo a la investigación realizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & la Universidad Industrial de Santander (S.F), la pasta para la producción de una tonelada de ladrillos cerámicos cocidos presenta la composición descrita en la Tabla 4:

**Tabla 4. Composición de la pasta para la producción de 1 tonelada de ladrillo cerámico cocido**

Material	Composición
<b>Arcilla</b>	1.161 Kg
<b>Chamote o material de rotura</b>	115 Kg
<b>Agua</b>	77 Kg

**Fuente:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander (S.F)

Según las características de la arcilla empleada en la producción de ladrillo, los tres métodos más importantes para hacer ladrillos se pueden dividir en tres grupos (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F):

- Proceso plástico de corte mediante alambre
- Proceso plástico compacto
- Proceso semiseco o semiplástico

En el contexto nacional se emplea el proceso plástico de corte mediante alambre y el proceso plástico compacto (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F). El primero es el más empleado en Colombia y se caracteriza por adaptarse a la producción de ladrillos a partir de arcillas de baja calidad, en los que se emplea una pasta de plasticidad máxima, con un contenido de humedad del 15 al 20%; es un proceso en el que no se emplea moldes para moldear los ladrillos, estos se producen a partir de la extrusión de una columna de pasta de arcilla que es cortada en ladrillos por una maquina cortadora (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F). Mientras que el proceso plástico compacto, empleado en Colombia en menor proporción, emplea una pasta de un contenido de agua del 10 al 15%, de acuerdo a las características de la arcilla empleada, y un proceso con prensas que emplean moldes y presión para formar los ladrillos.

La industria ladrillera de Colombia produce cuatro clases de ladrillos (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F):

### **3.1.1. Ladrillo ordinario de construcción:**

Son ladrillos fabricados con arcillas más o menos arenosas y magras, que se caracterizan por tener una resistencia a la presión de 105 kg/cm<sup>2</sup> a 492 kg/cm<sup>2</sup> y una absorción de agua mayor o igual al 8%; en esta clasificación se encuentran tres tipos de ladrillos, según sus dimensiones, ver Tabla 5 (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F):

**Tabla 5. Especificaciones de ladrillos ordinarios**

<b>Tipo</b>	<b>Dimensiones (cm)</b>
<b>T1 macizo</b>	25*16*6
<b>T2 macizo</b>	25*12,5*7
<b>T3 macizo</b>	40*20*10

**Fuente:** British Standard Specifications en Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander (S.F)

### **3.1.2. Ladrillos de ingeniería o vitrificados:**

Son empleados para pavimento de calles; se caracterizan por ser de color oscuro y poseer una resistencia superior a 492 kg/cm<sup>2</sup> un promedio de absorción de agua por peso de 4,5 a 7%.

### **3.1.3. Ladrillos de construcción huecos**

Contienen uno o más espacios vacíos que los atraviesan y se caracterizan por ser ligeros y resistentes estructuralmente; los ladrillos huecos se subdividen en:

- Ladrillos para paredes interiores y tabiques y
- Ladrillos para pisos, techos, buhardillas y estructurales

En esta clasificación se presentan tres tipos de ladrillos, de acuerdo a sus dimensiones, como se describe en la Tabla 6 (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F):

**Tabla 6. Especificaciones de ladrillos de construcción huecos**

<b>Tipo</b>	<b>Dimensiones (cm)</b>
<b>H2 huecos</b>	35*18*13
<b>H3 huecos</b>	35*23*9
<b>H10 huecos</b>	45*20*10
<b>H15 huecos</b>	40*25*15
<b>H20 huecos</b>	40*25*20
<b>H23 huecos</b>	35*23*18

**Fuente:** British Standard Specifications en Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander (S.F)

#### **3.1.4. Ladrillos de fachada o enchape**

Empleados en la construcción del interior de las edificaciones, se caracterizan por poseer tamaño y forma uniforme, ser de colores (rojo, amarillo, gris), sólidos y poseer una alta resistencia a la intemperie (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F).

En cuanto al uso de tecnologías, se destaca que el sector ladrillero colombiano ha evolucionado considerablemente en las últimas décadas, hasta llegar a tener, en algunas plantas, tecnologías de punta provenientes de Estados Unidos y Europa; que además de contribuir con la competitividad del sector e incrementar su productividad, han respondido a los retos ambientales de la industria para disminuir el consumo de combustibles fósiles, optimizar la extracción de materias primas y minimizar la emisión de gases efecto invernadero asociados principalmente a los procesos de secado y cocción del ladrillo (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Universidad Industrial de Santander, S.F).

### **3.2. Ladrillos cerámicos modificados**

El sector ladrillero colombiano se encuentra en deuda con uno de los retos ambientales más importantes para el sector, la disminución de la demanda de

recursos naturales, específicamente la arcilla y los combustibles fósiles empleados en los procesos de secado y cocción de las piezas. Esto se consigue a través de la incorporación en la pasta cerámica de materiales alternativos provenientes de subproductos y residuos de otros procesos productivos, materia orgánica, entre otros; que da lugar igualmente a la reducción de las necesidades energéticas en el proceso cerámico. La obtención entonces de estos materiales cerámicos modificados contribuyen con la reducción de impactos ambientales y el mejoramiento del desempeño energético de los ladrillos. Sin embargo, aunque a esta instancia de este trabajo de investigación se han encontrado evidencias de que a nivel nacional e internacional se ha trabajado en la fabricación de ladrillos que incorporan residuos como cascarilla de arroz, lodos papeleros, plásticos y otro tipo de materiales a la pasta cerámica, con el propósito de disminuir el consumo de arcilla mientras se mejora el desempeño térmico y ambiental de los mismos; en el contexto colombiano no es evidente una producción masiva de ladrillos cerámicos que incorporen este tipo de materiales en la pasta cerámica (Acosta, 2000; Alavedra, Domínguez, Gonzalo, & Serra, 1998; Bedoya Montoya, 2009; Cabo Laguna, 2011 & Pernet, 2011).

Es así como se da origen al ladrillo cerámico aligerado; el cual, de acuerdo a la Asociación Española de Normalización y certificación – AENOR, es un ladrillo fabricado a partir de una pasta arcillosa constituida por materiales que desaparecen durante la cocción, añadiendo porosidad, ligereza y otras características a la pieza cocida (Universidad de Oviedo, S.F.). Para efectos de esta investigación se empleará, en la pasta cerámica, un combustible alternativo conocido como combustible sólido recuperado – CSR y cenizas volantes como materiales aligerantes en ladrillos cerámico y/o como materiales que permiten mejorar el desempeño ambiental y energético de dichas piezas. Para el caso del CSR, como combustible alternativo, que se incorpora a la pasta cerámica en cantidades que dependen tanto de las características del combustible como de las características que se quieran obtener tras la cocción, además de aportar ligereza, supone (Elias,

S.F.):

- Un ahorro de energía al aportar poder calorífico al proceso,
- Una reducción en la temperatura de cocción y por ende en el consumo de energía, asociado a la existencia de materiales fundentes en algunos de los residuos empleados como combustibles alternativos,
- Un mejoramiento las condiciones de aislamiento térmico asociado al aumento de porosidad, y
- Una alternativa para el manejo tratamiento de residuos

De este modo se proponen los siguientes ladrillos modificados para el análisis del desempeño energético-ambiental objeto de este trabajo, en comparación con el ladrillo tradicional previamente descrito:

### **3.2.1. Ladrillo cerámico tradicional cocido con combustible sólido recuperado**

El ladrillo cerámico tradicional al que se hace referencia en esta investigación es el propuesto por el proyecto de tecnologías limpias desarrollado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander (S.F), cuya pasta cerámica, para la producción de una tonelada de ladrillo cerámico cocido, está constituida por:

**Tabla 7. Composición de la pasta cerámica para la fabricación de ladrillo tradicional**

<b>Material</b>	<b>Cantidad (kg)</b>
<b>Arcilla</b>	1.161
<b>Chamote</b>	132
<b>Agua</b>	77

**Fuente:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander (S.F)

En el proceso de cocción de esta pieza se reemplaza el carbón empleado en el secado y cocción por CSR, bio-sólido seco producido en los procesos anaeróbicos

de tratamiento de residuos sólidos urbanos e industriales, caracterizados por poseer un calorífico superior al de algunos carbones de baja calidad (Castro Pelaez, y otros, 2014 & Elias, 2009). Para efectos de esta investigación se tomará como referencia el CSR que está siendo producido en el municipio del Carmen de Viboral, Antioquia, en el marco del desarrollo del proyecto piloto de bio-digestion en fase seca que están realizando el Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares – GIEM de la Universidad de Antioquia y la Gobernación de Antioquia; en cuya producción se procesa la fracción orgánica de los residuos urbanos, separada en fuente, de dicho municipio (Castro Pelaez, y otros, 2014).

### ***3.2.2. Ladrillo cerámico con 7% de combustible sólido recuperado adicionado a la pasta cerámica en sustitución de arcilla y cocido con este mismo material***

Para obtener este tipo de ladrillo cerámico se sustituye el 7% del peso de la arcilla contenida en la pasta cerámica empleada para la producción del ladrillo tradicional descrito en el numeral 3.2.1 por CSR. La nueva pasta cerámica, para la producción de una tonelada de ladrillo cerámico cocido, presenta entonces la siguiente formulación:

**Tabla 8. Composición de la pasta cerámica para la fabricación de ladrillo cerámico con 7% de CSR**

<b>Material</b>	<b>Cantidad (kg)</b>
<b>Arcilla</b>	1.080
<b>Chamote</b>	132
<b>CSR</b>	81
<b>Agua</b>	77

Adicionalmente, el carbón empleado tradicionalmente en los procesos de secado y cocción de esta pieza es sustituido por CSR, según lo descrito en el numeral 3.2.1.

**3.2.3. Ladrillo cerámico con 7% de combustible sólido recuperado y 20% de cenizas volantes adicionadas a la pasta cerámica, en sustitución de arcilla, y cocido con combustible sólido recuperado**

Para obtener este tipo de ladrillo cerámico se sustituye el 27% del peso de la arcilla contenida en la pasta cerámica empleada para la producción del ladrillo tradicional descrito en el numeral 3.2.1 por dos materiales: 7% de CSR y 20% de cenizas volantes. La nueva pasta cerámica, para la producción de una tonelada de ladrillo cerámico cocido, presenta la siguiente formulación:

**Tabla 9. Composición de la pasta cerámica para la fabricación de ladrillo cerámico con 7% de CSR y 20% de cenizas volantes**

<b>Material</b>	<b>Cantidad (kg)</b>
<b>Arcilla</b>	848
<b>Chamote</b>	132
<b>CSR</b>	81
<b>Cenizas volantes</b>	232
<b>Agua</b>	77

Adicionalmente, el carbón empleado tradicionalmente en los procesos de secado y cocción de esta pieza es sustituido por CSR, según lo descrito en el numeral 3.2.1.

#### **4. Análisis del desempeño ambiental y energético de ladrillos cerámicos tradicionales y ladrillos modificados**

El desempeño ambiental son todas las gestiones que se realizan para modificar, de forma positiva o negativa, el medio ambiente durante la producción de un producto o la prestación de un servicio (International Organization for Standardization -ISO, 2004). Es así como una gestión ambiental que promueva el mejoramiento de las condiciones ambientales y energéticas de un producto o

servicio, mientras se disminuyen los impactos de estos sobre el medio ambiente, se convierte en un aporte a la tarea de conseguir el desarrollo sostenible. Existen diferentes estrategias, sistemas y herramientas a través de las cuales se puede mejorar el desempeño ambiental de un producto y/o servicio: tecnologías limpias, prevención de la contaminación, adopción de políticas y estrategias corporativas de sostenibilidad e innovación en el producto o servicio que se ofrece (Hoof & Nydia, 2005).

Dado que el desempeño ambiental de un producto o servicio debe ser evaluado bajo un enfoque integral, en el que se consideren los impactos ambientales que se encuentran integrados tanto al producto y/o servicio como a los procesos que intervienen en su producción o prestación (Hoof & Nydia, 2005). Es así como para efectos de este trabajo de investigación se hará una aproximación al cálculo del desempeño ambiental y energético de los ladrillos cerámicos descritos en el numeral anterior, a través del uso de dos herramientas:

- Cálculo de los requerimientos energéticos en la producción (ver Anexo 1. Cálculos de los requerimientos energéticos en la producción de los ladrillos)
- Análisis de ciclo de vida

Adicionalmente se describirá y propondrá el uso de la herramienta de Externalidades para valorar algunos beneficios y costos sociales asociados a la fabricación de ladrillos cerámicos modificados (ver Anexo 2. Cálculos externalidades).

#### **4.1. Requerimientos energéticos en la producción de los ladrillos**

En el proceso de producción de ladrillos cerámicos intervienen dos tipos de energía: energía térmica y energía eléctrica (Elias, S.F.). Para efectos de esta investigación sólo se considerará el balance de energía térmica; para lo cual es importante considerar que el proceso cerámico no presente cambios de masa

representativos dado que la arcilla (principal materia prima en la producción de ladrillos cerámicos) no contiene o contiene bajos porcentajes de materia orgánica y que el calor de descomposición, asociado al agua de constitución y a las sales susceptibles de descomposición, hacen parte del calor de reacción (Elias, S.F.). Además del calor de reacción, en el balance energético se tendrá en cuenta el calor de calentamiento, las pérdidas de calor a través de paredes y el calor sensible de los humos, como se muestre en la Ecuación 1.

**Ecuación 1. Balance asociado a la energía térmica en la producción de ladrillos cerámicos**

$$\text{Balance energético} = C. \text{Calentamiento} + C. \text{Reacción} + C. \text{Sensible} + \text{Pérdidas}$$

Es de anotar que en la Ecuación 1 no se incluye el calor latente debido a la evaporación de una fracción de agua que queda luego del secado y que ocurre al inicio del proceso de cocción. Esta fracción de agua fue considerada dentro del 8% de humedad contenida en la arcilla y para la cual, según Elias (S.F), se establece un requerimiento calórico de 600 Kcal/Kg H<sub>2</sub>O.

**4.1.1. Calor de calentamiento**

Este calor hace referencia a la acumulación de calor del material a cocer (Elias, S.F.), para lo cual se empleo la Ecuación 2:

**Ecuación 2. Calculo del calor de calentamiento**

$$\text{Calor de calentamiento} = Kg_{\text{Arcilla}} * \text{Calor específico} \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}_{\text{Arcilla}} \text{ } ^\circ\text{C}} * T. \text{de quema (} ^\circ\text{C)}$$

De acuerdo con Elias (S.F.) la arcilla tiene un calor específico de 0.24 Kcal/Kg°C y se espera una temperatura de quema de 1,000 °C para la pasta cerámica del

ladrillo tradicional y la pasta cerámica con 7% de CSR, y de 950 °C para la pasta cerámica con 7% de CSR y 20% de cenizas volantes. Las cantidades de arcilla para cada una de las pastas cerámicas propuestas, de acuerdo al tipo de ladrillo cerámico, se presentan en la Tabla 10.

**Tabla 10. Cantidades de arcilla a cocer según el tipo de ladrillo cerámico**

<b>Tipo de ladrillo</b>	<b>Peso de arcilla a cocer (Kg)</b>
<b>Ladrillo tradicional</b>	1.161
<b>Ladrillo con CSR como combustible</b>	1.161
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica</b>	1.080
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% cenizas volantes en la pasta cerámica</b>	0.848

La Tabla 11 presente el calor de calentamiento para cada tipo de pasta cerámica:

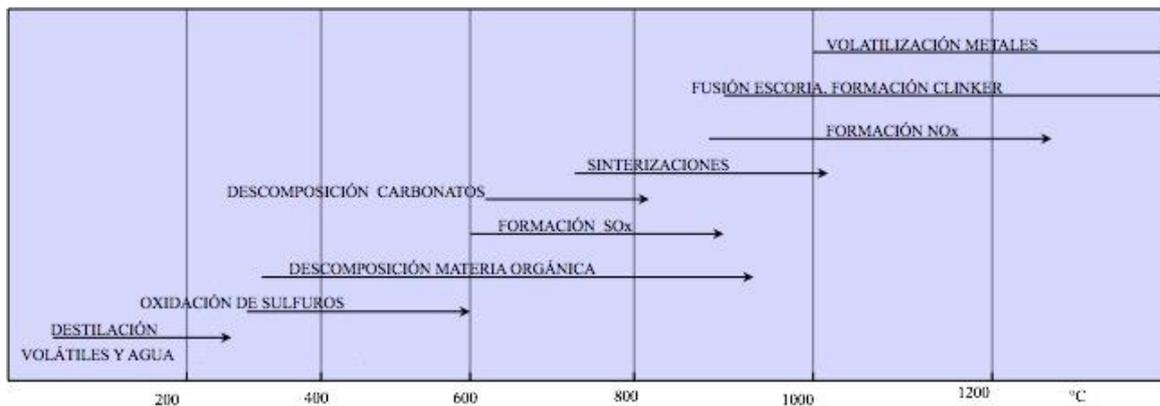
**Tabla 11. Calores de calentamiento para cada tipo de ladrillo cerámico**

<b>Tipo de ladrillo cerámico</b>	<b>Calor de calentamiento (Kcal)</b>
<b>Ladrillo tradicional</b>	278.64
<b>Ladrillo con CSR como combustible</b>	278.64
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica</b>	259.2
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% cenizas volantes en la pasta cerámica</b>	203.52

#### **4.1.2. Calor de reacción**

La energía térmica es la base de las reacciones físico-químicas que constituyen la esencia de la cocción cerámica; tales reacciones se dan a altas temperaturas, siendo las reacciones de pérdida de agua de cristalización de los minerales de arcilla las que absorben mayor calor; tales reacciones se dan entre

550 y 800 °C (Elias, S.F.). De acuerdo a los procesos termoquímicos que suceden dentro del proceso de cocción existen 3 grupos de requerimiento de calor significativos: evaporación y destilación de agua, descomposición de la materia orgánica y transformación de estructuras minerales, Figura 8. En virtud a las cantidades relativas de agua-carbono-minerales, el mayor requerimiento se va a dar en relación con el agua.



**Figura 8. Reacciones ocurridas en el proceso de cocción de la arcilla a temperaturas específicas.**

Fuente: Elias (S.F.).

### Ecuación 3. Calculo del calor de reacción

$$\text{Calor de reacción} = Kg_{\text{Arcilla}} * \frac{Kg_{H_2O}}{Kg_{\text{Arcilla}}} + \frac{Kcal}{Kg_{H_2O}}$$

Al asumir que la arcilla contiene un 8% de agua, que se requieren 600 kilo calorías por kilogramo de agua (Kcal/Kg H<sub>2</sub>O) y las composiciones de arcilla de los diferentes tipos de pasta cerámica de la Tabla 10; se obtienen los siguientes calores de reacción, ver Tabla 12.

**Tabla 12. Calores de reacción para cada tipo de ladrillo cerámico**

<b>Tipo de ladrillo cerámico</b>	<b>Calor de reacción (Kcal)</b>
<b>Ladrillo tradicional</b>	55.73
<b>Ladrillo con CSR como combustible</b>	55.73
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica</b>	51.84
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% cenizas volantes en la pasta cerámica</b>	40.70

#### **4.1.3. Calor sensible de los humos**

El calor sensible de los humos es una función del caudal de gases, del calor específico y del cambio de temperatura entre la salida de estos y el ambiente externo (Elias, S.F.). Se empleará un calor sensible de 120 Kcal, según recomendación del experto Xavier Elias<sup>2</sup>, para los diferentes tipos de pasta cerámica.

#### **4.1.4. Pérdida de calor a través de paredes**

La pérdida de calor a través de paredes es una variable que depende tanto de condiciones y características de los hornos, como el tipo de horno y el aislamiento térmico con el que cuenta este, como de las condiciones de combustión

---

<sup>2</sup> Xavier Elias Castells es un ingeniero industrial, experto senior, profesor en instituciones españolas y sudamericanas, con amplia experiencia en consultoría e ingeniería en diversos ámbitos como:

- Valorización de residuos. Ahorro de energía.
- Conversión energética de residuos. Estudios de viabilidad.
- Balances de energía y cálculo de optimización de procesos.
- Tecnología cerámica. Diseño de hornos y secadores.

Xavier Elias Castells se ha desempeñado como Director de la revista electrónica "Subproductos" y ha publicado libros sobre:

- Reciclaje de residuos industriales (2000 Ed. Díaz de Santos).
- Tratamiento y valorización energética de residuos (2005 Ed. Díaz de Santos).
- Reciclaje de residuos industriales, residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora (2009 Ed. Díaz de Santos).
- Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad (2011 Ed. Díaz de Santos).
- El empleo de materiales cerámicos en construcción (1995 Ed. ETSECCP).
- Ingeniería Ambiental (Master a distancia: FUNIBER)
- Tecnología y Ciencia Cerámica (Master a distancia: FUNIBER)

como la circulación y velocidad de los gases (Elias, S.F.). Se emplearán dos valores para las pérdidas de calor a través de paredes, según recomendación del experto Xavier Elias, como se muestra en la Tabla 13, según el tipo de pasta cerámica:

**Tabla 13. Pérdidas de calor a través de paredes según tipo de ladrillo cerámico**

<b>Tipo de ladrillo cerámico</b>	<b>Pérdidas de calor a través de paredes (Kcal)</b>
<b>Ladrillo tradicional</b>	
<b>Ladrillo con CSR como combustible</b>	70
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en pasta cerámica</b>	
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% cenizas volantes en la pasta cerámica</b>	66.5

Usando la Ecuación 1, y los cálculos y/o consideraciones presentados en los numerales 4.1.1 a 4.1.4, el balance energético para los diferentes tipos de pasta cerámica es el siguiente, ver Tabla 14:

**Tabla 14. Balance energético y consumo de combustible (CSR) para cada tipo de ladrillo cerámico**

<b>Tipo de ladrillo</b>	<b>Balance energético (Kcal)</b>	<b>Consumo de CSR (Kg CSR/ Kg arcilla)</b>
<b>Ladrillo con CSR como combustible</b>	524.37	0.150
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica</b>	501.04	0.143
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% cenizas volantes en la pasta cerámica</b>	420.55	0.123

\*Los valores del balance de energía para el ladrillo tradicional son los mismos del ladrillo con CSR como combustible

## **4.2. Análisis de ciclo de vida**

El ACV fue planteado en la cumbre mundial para el Desarrollo Sustentable de Johannesburgo, 2002, como un modelo para “mejorar los productos y servicios a la vez que se reducen los impactos en salud y medio ambiente” (Hoof & Nydia, 2005).

El ACV es una metodología que además de permitir la integración de los impactos ambientales ocurridos a lo largo del ciclo de vida y los relaciona con problemas ambientales específicos; permite establecer una unidad de medida ambiental basado en los diferentes problemas ambientales y establecer prioridades ambientales que permiten planificar el mejoramiento del desempeño ambiental de un producto o servicio (Hoof & Nydia, 2005).

El ACV propuesto en esta investigación se enmarca en el proceso productivo de ladrillos cerámicos para uso en el proyecto de VIP Tirol III, Megaproyecto Pajarito, desarrollado por ISVIMED en la ciudad de Medellín (ver Figura 9), considerando la obtención de un ladrillo cerámico tradicional y de los ladrillos cerámicos modificados descritos en el numeral 3.2, a partir de las siguientes etapas: extracción y preparación de la arcilla, formación, corte, secado, cocción y distribución del ladrillo.



**Figura 9. Ubicación proyecto Tirol III, Megaproyecto Pajarito**  
**Fuente:** Instituto Social de Vivienda y Hábitat de Medellín (2014)

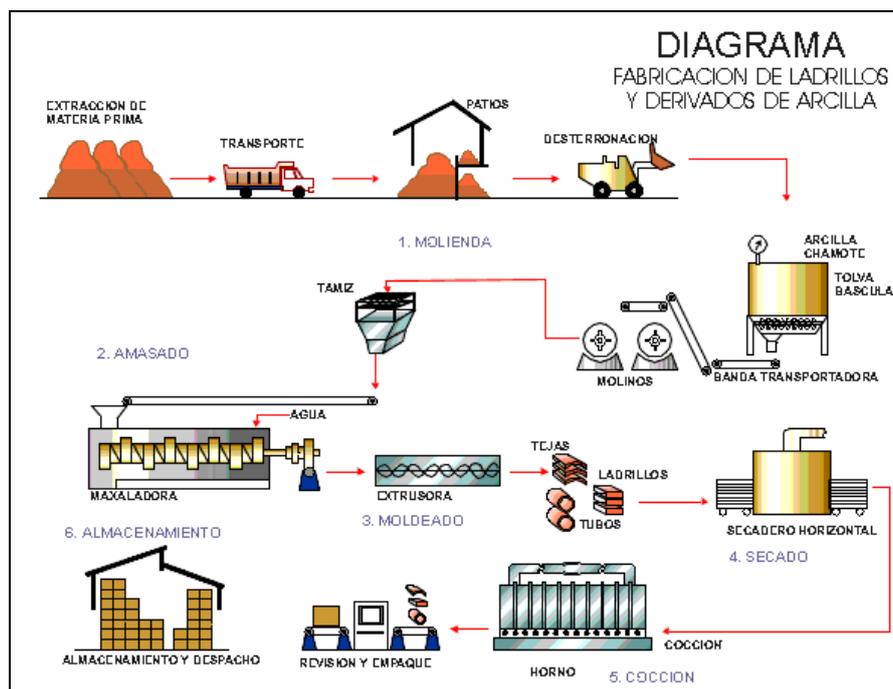
En este ACV, se establece como unidad funcional 1 y 0.92 Kg de arcilla cocida, según el tipo de ladrillo cerámico (ver Tabla 15), producido en una ladrillera con horno tipo Hoffman.

**Tabla 15 Unidad funcional para el ACV, según tipo de ladrillo cerámico**

<b>Tipo de ladrillo cerámico</b>	<b>Unidad funcional (Kg)</b>
<b>Ladrillo tradicional</b>	1
<b>Ladrillo con CSR como combustible</b>	1
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica</b>	0,92
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% cenizas volantes en la pasta cerámica</b>	0,92

#### **4.2.1. Inventario del sistema analizado**

El esquema básico para la producción de ladrillos se presenta en la Figura 10:



**Figura 10. Esquema básico del proceso de fabricación de ladrillos**

**Fuente:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander (S.F)

Dentro del inventario global del proceso de fabricación de ladrillos cerámicos modificados a partir del uso de CSR como elemento constituyente de la pasta cerámica y/o como combustible alternativo empleado en los proceso de secado y cocción de este se destaca un importante impacto positivo: el metano evitado por disposición del CSR en rellenos sanitarios. Para estimar este impacto se empleó el modelo de decaimiento exponencial de primer orden requerido por la herramienta “Tool to determine methane emissions avoided from dumping waste at a solid waste disposal site”, versión 2 para proyectos de Mecanismos de Desarrollo Limpio.

En este proceso se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Una tasa de decaimiento del CSR de 0.032
- De acuerdo a los análisis de laboratorio realizados, el 27 de febrero de 2014, a una muestra de CSR proveniente del proceso de aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos urbanos generados en el Carmen de Viboral, El CSR contiene un porcentaje de carbono orgánico del 33.80% (Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares, 2014).

De lo anterior se estima que el volumen de metano evitado de acuerdo al tipo de ladrillo cerámico modificado propuesto es el siguiente, ver Tabla 16:

**Tabla 16. Metano evitado por el uso de CSR en el proceso de fabricación de ladrillo cerámico como materia prima de la pasta cerámico y/o como combustible**

<b>Tipo de ladrillo cerámico</b>	<b>CSR empleado (Kg)</b>	<b>Metano evitado (Kg CH<sub>4</sub>/Kg CSR)</b>
<b>Ladrillo con CSR como combustible</b>	0.13657	4.201E-04
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica</b>	0.21263	6.541E-04
<b>Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% cenizas volantes en la pasta cerámica</b>	0.20515	6.320E-04

#### **4.2.1.1. Producción**

El proceso de producción de ladrillos cerámicos inicia con el proceso de selección de las arcillas que cumplan con propiedades físicas y químicas requeridas para su producción; material que es llevado a procesos de curado, amasado, moldeo, secado, cocción y empaquetado (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F).

##### **a. Proceso de explotación de arcilla**

###### **- Descripción de la etapa de explotación de arcilla**

La explotación de arcillas es un proceso minero que se realiza en minas de cielo abierto en las que, generalmente, de acuerdo al tamaño de la industria que realiza la actividad se usan dos métodos (Mesa Sectorial de Minería, 2003):

- **Industrias grandes y medianas:** el proceso de explotación se da a través de la conformación de terrazas, en las que la transferencia de material se hace en forma de bancos interconectados, favoreciendo el acceso de las maquinaria y el movimiento de la materia prima. Este método de extracción se caracteriza por el uso de maquinaria mecánica como retroexcavadoras, buldócer, cargadores, volqueta, entre otros; y por la implementación de

programas de planeación minera que promueven programas de reforestación y de recuperación de material estéril.

- Pequeña industria: se emplean métodos artesanales, caracterizados por el uso de herramientas manuales y la aplicación de técnicas de minería de ladera, los cuales propician la ocurrencia de derrumbes y otros impactos ambientales significativos.

El transporte de arcillas en la planta se realiza, generalmente, mediante cintas transportadoras; operación que puede generar emisiones de material particulado y pérdidas de materia prima que se puede convertir en residuos (Centro Nacional de Producción Más Limpia, 2013).

#### **- *Datos de inventario en la etapa de explotación de arcillas***

Para realizar el inventario de la etapa de extracción de la arcilla se tomaron datos de la base de datos ECOINVENT (ecoinvent Association, 2007) y de los balances de masa y energía desarrollados en el marco del proyecto de tecnologías limpias del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander (S.F), bajo las siguientes suposiciones:

- Se tuvieron en cuenta los procesos de excavación, transporte hasta la molienda primaria, uso de la tierra en el proceso de minería y el área de reforestación. Los datos incluyen los requerimientos de combustibles para la excavación.
- El espesor de la capa de tierra es de 30 metros y los equipos de transporte funcionan con combustible diesel, por lo que no hay consumo de energía eléctrica.
- La tecnología empleada en la explotación de arcilla es la tecnología empleada típicamente en Suiza

A continuación se presentan los datos de inventario para la etapa de extracción que fueron tenidos en cuenta para cada tipo de ladrillo cerámico analizado. Tales

datos se basan en los requerimientos de arcilla para la obtención de 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico.

**Tabla 17. Datos de inventario para la etapa de extracción de arcilla – Ladrillo cerámico tradicional**

<b>Etapa de extracción de arcilla</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
Arcilla	1.16100	Kg	Arcilla	1.16100	Kg
<b>Energía</b>					
Diesel quemado	0.03448	MJ			
<b>Otros aspectos</b>					
			Ocupación de la tierra	2.19E-05	m <sup>2</sup>
			Transformación de un uso	2.19E-05	m <sup>2</sup>
			Transformación a sitio de extracción	2.19E-05	m <sup>2</sup>
			Transformación a otro uso	2.19E-05	m <sup>2</sup>
			Reforestación	2.19E-05	m <sup>2</sup>

**Tabla 18. Datos de inventario para la etapa de extracción de arcilla – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible**

<b>Etapa de extracción de arcilla</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
Arcilla	1.16100	Kg	Arcilla	1.16100	Kg
<b>Energía</b>					
Diesel quemado	0.03448	MJ			
<b>Otros aspectos</b>					
			Ocupación de la tierra	2.19E-05	m <sup>2</sup>
			Transformación de un uso	2.19E-05	m <sup>2</sup>
			Transformación a sitio de extracción	2.19E-05	m <sup>2</sup>
			Transformación a otro uso	2.19E-05	m <sup>2</sup>
			Reforestación	2.19E-05	m <sup>2</sup>

Tabla 19. Datos de inventario para la etapa de extracción de arcilla – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica

Etapa de extracción de arcilla					
<i>Entrada</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Salida</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>
<b> Materiales</b>					
Arcilla	0.84753	Kg	Arcilla	0.84753	Kg
<b> Energía</b>					
Diesel quemado	0.02517	MJ			
<b> Otros aspectos</b>					
			Ocupación de la tierra	1.60E-05	m <sup>2</sup>
			Transformación de un uso	1.60E-05	m <sup>2</sup>
			Transformación a sitio de extracción	1.60E-05	m <sup>2</sup>
			Transformación a otro uso	1.60E-05	m <sup>2</sup>
			Reforestación	1.60E-05	m <sup>2</sup>

Tabla 20. Datos de inventario para la etapa de extracción de arcilla – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica

Etapa de extracción de arcilla					
<i>Entrada</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Salida</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>
<b> Materiales</b>					
Arcilla	1.07973	Kg	Arcilla	1.07973	Kg
<b> Energía</b>					
Diesel quemado	0.03207	MJ			
<b> Otros aspectos</b>					
			Ocupación de la tierra	2.04E-05	m <sup>2</sup>
			Transformación de un uso	2.04E-05	m <sup>2</sup>
			Transformación a sitio de extracción	2.04E-05	m <sup>2</sup>
			Transformación a otro uso	2.04E-05	m <sup>2</sup>
			Reforestación	2.04E-05	m <sup>2</sup>

### ***b. Etapa de maduración de la arcilla y trituración***

#### ***- Descripción de la etapa de maduración de la arcilla y trituración***

Antes de incorporar la arcilla al ciclo de producción, hay que someterla a

tratamientos de mezcla, trituración, homogenización y reposo en un acopio, con la finalidad de obtener una consistencia adecuada y uniformidad de las características físicas y químicas deseadas (Centro Nacional de Producción Más Limpia, 2013).

En este proceso se incorporan los diferentes tipos de arcillas que van a componer la mezcla final; de modo que se puedan alcanzar propiedades específicas del ladrillo tales como color o resistencia. La mezcla se somete a reposo a la intemperie para facilitar el desmenuzamiento de los terrones y la disolución de los nódulos para impedir las aglomeraciones de las partículas arcillosas. La exposición a la acción atmosférica favorece, además, la descomposición de la materia orgánica que pueda estar presente y permite la purificación química y biológica del material, de manera que se pueda obtener un material inerte (Clay Brick Association, 2002).

**- *Datos de inventario en la etapa de maduración de la arcilla y trituración***

Para realizar el inventario de la etapa de maduración de la arcilla y trituración se tomaron datos de los balances de masa y energía desarrollados en el marco del proyecto de tecnologías limpias del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander (S.F), bajo las siguientes consideraciones:

- El consumo de energía eléctrica está asociado al consumo del equipo mezclador.
- En esta etapa no se tuvo en cuenta datos asociados al cambio de uso del suelo ni a la infraestructura requerida para la maduración y trituración de la arcilla necesaria para obtener 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico.

A continuación se presentan los datos de inventario para la etapa de maduración de arcilla y trituración que fueron tenidos en cuenta para cada tipo de ladrillo cerámico analizado. Tales datos se basan en los requerimientos de arcilla para la

obtención de 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico propuesto.

**Tabla 21. Datos de inventario para la etapa de maduración de la arcilla y trituración arcilla – Ladrillo cerámico tradicional**

<b>Etapa de maduración de la arcilla y trituración</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
<b>Arcilla</b>	1.16100	Kg	Mezcla triturada	1.26835	Kg
<b>Chamote</b>	0.13150	Kg	Material particulado	0.02415	Kg
<b>Energía</b>					
<b>Electricidad</b>	0.02639	MJ			

**Tabla 22. Datos de inventario para la etapa de maduración de la arcilla y trituración arcilla – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible**

<b>Etapa de maduración de la arcilla y trituración</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
<b>Arcilla</b>	1.16100	Kg	Mezcla triturada	1.26835	Kg
<b>Chamote</b>	0.13150	Kg	Material particulado	0.02415	Kg
<b>Energía</b>					
<b>Electricidad</b>	0.02639	MJ			

**Tabla 23. Datos de inventario para la etapa de maduración de la arcilla y trituración arcilla - Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica**

<b>Etapa de maduración de la arcilla y trituración</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
<b>Arcilla</b>	0.84753	Kg	Mezcla triturada	1.26835	Kg
<b>Chamote</b>	0.13150	Kg	Material particulado	0.02415	Kg
<b>CSR</b>	0.08127	Kg			
<b>Cenizas volantes</b>	0.23220	Kg			
<b>Energía</b>					
<b>Electricidad</b>	0.02639	MJ			

**Tabla 24. Datos de inventario para la etapa de maduración de la arcilla y trituración arcilla - Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica**

<b>Etapa de maduración de la arcilla y trituración</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
<b>Arcilla</b>	1.07973	Kg	Mezcla triturada	1.26835	Kg
<b>Chamote</b>	0.13150	Kg	Material particulado	0.02415	Kg
<b>CSR</b>	0.08127	Kg			
<b>Energía</b>					
<b>Electricidad</b>	0.02639	MJ			

### ***c. Etapa de molienda***

#### ***- Descripción de la etapa de molienda***

La molienda es un proceso de preparación de la materia prima a través del cual el material arcilloso se reduce de tamaño (Mesa Sectorial de Minería, 2003). La molienda de arcilla en los procesos cerámicos se da, generalmente, en dos etapas: una trituración preliminar que permita reducir el tamaño del material y mejorar las condiciones de posteriores trituraciones; mientras que en la segunda etapa, conocida como pulverización o molienda, se obtienen partículas más finas. Ambos procesos se pueden realizar en fase seca o en fase húmeda, en ambos casos se requiere de tratamientos mecánicos con trituradores, quebrantadores, molinos, laminadores y tamices (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F).

#### ***- Datos de inventario en la etapa de molienda***

Para realizar el inventario de la etapa de molienda se tomaron datos de los balances de masa y energía desarrollados en el marco del proyecto de tecnologías limpias del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander (S.F), bajo las siguientes consideraciones:

- El consumo de energía eléctrica está asociado al consumo del equipo

mezclador.

- En esta etapa no se tuvo en cuenta datos asociados al cambio de uso del suelo ni a la infraestructura requerida para la molienda de la arcilla necesaria para obtener 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico propuesto.

A continuación se presentan los datos de inventario para la etapa de molienda que fueron tenidos en cuenta para cada tipo de ladrillo cerámico analizado. Tales datos se basan en los requerimientos de arcilla para la obtención de 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico propuesto.

**Tabla 25. Datos de inventario para la etapa de molienda – Ladrillo cerámico tradicional**

<b>Etapa de molienda</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
<b>Mezcla triturada</b>	1.26835	Kg	Mezcla molida	1.29200	Kg
<b>Rotura seca</b>	0.03400	Kg	Material particulado	0.01035	Kg
<b>Energía</b>					
<b>Electricidad</b>	0.03769	MJ			

**Tabla 26. Datos de inventario para la etapa de molienda – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible**

<b>Etapa de molienda</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
<b>Mezcla triturada</b>	1.26835	Kg	Mezcla molida	1.29200	Kg
<b>Rotura seca</b>	0.03400	Kg	Material particulado	0.01035	Kg
<b>Energía</b>					
<b>Electricidad</b>	0.03769	MJ			

Tabla 27. Datos de inventario para la etapa de molienda - Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica

Etapa de molienda					
<i>Entrada</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Salida</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>
<b>Materiales</b>					
Mezcla triturada	1.26835	Kg	Mezcla molida	1.29200	Kg
Rotura seca	0.03400	Kg	Material particulado	0.01035	Kg
<b>Energía</b>					
Electricidad	0.03769	MJ			

Tabla 28. Datos de inventario para la etapa de molienda -Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de ceniza volante en la pasta cerámica

Etapa de molienda					
<i>Entrada</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Salida</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>
<b>Materiales</b>					
Mezcla triturada	1.26835	Kg	Mezcla molida	1.29200	Kg
Rotura seca	0.03400	Kg	Material particulado	0.01035	Kg
<b>Energía</b>					
Electricidad	0.03769	MJ			

#### **d. Etapa de amasado**

##### **- Descripción de la etapa de amasado**

El proceso de amasado es realizado en maquinas amasadoras y consiste en mezclar íntimamente la arcilla previamente adecuada con agua (humedad del 12 al 15%). La arcilla y el agua son dos de las variables que más influyen en este proceso (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F):

- *Arcillas:* es preciso emplear reguladores y dosificadores de arcilla que faciliten la fluidez e intensidad del proceso.
- *Agua:* la arcilla de ponerse en contacto con el agua al inicio del proceso de forma homogénea de modo que se garantice su adhesión a los cristales arcillosos, lo que redunda en una mejor plasticidad y cohesión de la pasta arcillosa.

**- Datos de inventario en la etapa de amasado**

Para realizar el inventario de la etapa de amasado se tomaron datos de los balances de masa y energía desarrollados en el marco del proyecto de tecnologías limpias del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & la Universidad Industrial de Santander (S.F), bajo las siguientes consideraciones:

- El consumo de energía eléctrica está asociado al consumo del equipo mezclador.
- En esta etapa no se tuvo en cuenta datos asociados al cambio de uso del suelo ni a la infraestructura requerida para el amasado de la arcilla necesaria para obtener 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico propuesto.

A continuación se presentan los datos de inventario para la etapa de amasado que fueron tenidos en cuenta para cada tipo de ladrillo cerámico analizado. Tales datos se basan en los requerimientos de arcilla para la obtención de 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico propuesto.

**Tabla 29. Datos de inventario para la etapa de amasado – Ladrillo cerámico tradicional**

<b>Etapa de amasado</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
<b>Mezcla molida</b>	1.29200	Kg	Mezcla amasada	1.41000	Kg
<b>Recortes</b>	0.06800	Kg			
<b>Agua</b>	0.05000	Kg			
<b>Energía</b>					
<b>Electricidad</b>	0,03768	MJ			

Tabla 30. Datos de inventario para la etapa de amasado - Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible

<b>Etapa de amasado</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
Mezcla molida	1.29200	Kg	Mezcla amasada	1.41000	Kg
Recortes	0.06800	Kg			
Agua	0.05000	Kg			
<b>Energía</b>					
Electricidad	0.03768	MJ			

Tabla 31. Datos de inventario para la etapa de amasado - Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica

<b>Etapa de amasado</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
Mezcla molida	1.29200	Kg	Mezcla amasada	1.41000	Kg
Recortes	0.06800	Kg			
Agua	0.05000	Kg			
<b>Energía</b>					
Electricidad	0.03768	MJ			

Tabla 32. Datos de inventario para la etapa de amasado - Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de ceniza volante en la pasta cerámica

<b>Etapa de amasado</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
Mezcla molida	1.29200	Kg	Mezcla amasada	1.41000	Kg
Recortes	0.06800	Kg			
Agua	0.05000	Kg			
<b>Energía</b>					
Electricidad	0.03768	MJ			

**e. Etapa de moldeado – extrusión**

**- Descripción de la etapa de moldeado – extrusión**

El proceso de moldeado consiste en hacer pasar la mezcla de arcilla a través de

una máquina extrusora, la cual cuenta con una boquilla que tiene la forma del objeto que se quiere producir (Mesa Sectorial de Minería, 2003). La extrusora está constituida por un cilindro horizontal dentro del cual gira un tornillo sinfín helicoidal que impulsa la pasta a través de la boquilla. A este proceso se alimenta la mezcla de arcilla con un contenido de humedad entre 18 y 25% y se incorpora una etapa de compactación en vacío para aumentar la plasticidad y remover aire de la arcilla, disminuyendo la porosidad de la masa, la cual puede generar pérdida de resistencia en el producto final (Clay Brick Association, 2002).

De este modo se obtiene una barra extruida de arcilla, la cual es cortada en piezas por un arreglo de alambres, de acuerdo al tamaño de ladrillo a producir. Las perforaciones de los ladrillos se logran en este proceso y su objetivo es aumentar el área superficial, reduciendo los tiempos de secado, cocción y enfriamiento, adicionalmente estas perforaciones permiten liberar las tensiones internas del ladrillo y de esta manera prevenir la distorsión y agrietamiento de los ladrillos durante la cocción (Clay Brick Association, 2002).

**- Datos de inventario en la etapa de moldeado – extrusión**

Para realizar el inventario de la etapa de moldeado – extrusión se tomaron datos de los balances de masa y energía desarrollados en el marco del proyecto de tecnologías limpias del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & la Universidad Industrial de Santander (S.F), bajo las siguientes consideraciones:

- El consumo de energía eléctrica está asociado al consumo del equipo mezclador.
- En esta etapa no se tuvo en cuenta datos asociados al cambio de uso del suelo ni a la infraestructura requerida para el moldeado - extrusión de la arcilla necesaria para obtener 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico propuesto.

A continuación se presentan los datos de inventario para la etapa de moldeado – extrusión que fueron tenidos en cuenta para cada tipo de ladrillo cerámico analizado. Tales datos se basan en los requerimientos de arcilla para la obtención de 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico propuesto.

**Tabla 33. Datos de inventario para la etapa de moldeado – extrusión – Ladrillo cerámico tradicional**

<b>Etapa de moldeado – extrusión</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
<b>Mezcla amasada</b>	1.41000	Kg	Ladrillo húmedo	1.36900	Kg
<b>Agua</b>	0.02700	Kg	Recortes	0.06800	Kg
<b>Energía</b>					
<b>Electricidad</b>	0.08672	MJ			

**Tabla 34. Datos de inventario para la etapa de moldeado – extrusión - Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible**

<b>Etapa de moldeado – extrusión</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
<b>Mezcla amasada</b>	1.41000	Kg	Ladrillo húmedo	1.36900	Kg
<b>Agua</b>	0.02700	Kg	Recortes	0.06800	Kg
<b>Energía</b>					
<b>Electricidad</b>	0.08672	MJ			

**Tabla 35. Datos de inventario para la etapa de moldeado – extrusión – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica**

<b>Etapa de moldeado – extrusión</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
<b>Mezcla amasada</b>	1.41000	Kg	Ladrillo húmedo	1.36900	Kg
<b>Agua</b>	0.02700	Kg	Recortes	0.06800	Kg
<b>Energía</b>					
<b>Electricidad</b>	0.08672	MJ			

**Tabla 36. Datos de inventario para la etapa de moldeo – extrusión – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica**

<b>Etapa de moldeado – extrusión</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
<b>Mezcla amasada</b>	1.41000	Kg	Ladrillo húmedo	1.36900	Kg
<b>Agua</b>	0.02700	Kg	Recortes	0.06800	Kg
<b>Energía</b>					
<b>Electricidad</b>	0.08672	MJ			

#### **f. Etapa de Secado**

##### **- Descripción de la etapa de secado**

El proceso de secado se lleva a cabo con el propósito de eliminar parte del agua contenida en la pieza cerámica, incorporada en el proceso de amasado. Este proceso se da en 3 fases (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F):

- Pérdida de agua contenida en los poros,
- Eliminación de agua hasta alcanzar máxima contracción, y
- Pérdida del resto de agua, permitiendo la aparición de poros.

Este proceso se lleva a cabo de forma natural, empleando amplias áreas cubiertas o a la intemperie para que por acción de las condiciones atmosféricas que operan en el lugar se de este proceso, y en secaderos artificiales en el que se requiere de consumos energéticos pero se mejora el rendimiento del proceso. En el caso del sector ladrillero del país prevalece el uso de secaderos continuos, tipo túnel, que consiste en una galería en la que se inyecta aire caliente en contracorriente al material que es transportado a través del túnel en vagones o estanterías; el proceso dura de 20 a 24 horas y la temperatura entre el extremo frío y el caliente varía de 30 a 120 grados centígrados (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F).

El secado es quizás el proceso más importante en la producción de ladrillo, ya que es en este proceso donde se presenta el porcentaje más alto de pérdidas de producción asociadas a inconformidades en el producto tales como fisuras, deformaciones, entre otros (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F).

- ***Datos de inventario en la etapa de secado***

Para realizar el inventario de la etapa de secado se tomaron datos de los balances de masa y energía desarrollados en el marco del proyecto de tecnologías limpias del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & la Universidad Industrial de Santander (S.F), bajo las siguientes consideraciones:

- El consumo de energía eléctrica asociado al consumo de ventiladores de entrada de aire de secado y de entrada de aire de combustión no fueron tenidos en cuenta.
- En esta etapa no se tuvo en cuenta datos asociados al cambio de uso del suelo ni a la infraestructura requerida para el secado de la arcilla necesaria para obtener 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico propuesto.
- Se empleo un horno de secado continuo.
- Para algunos ladrillos se sustituye el consumo de carbón por un combustible alternativo, CSR.
- Dado que no se cuenta con un estudio detallado de las emisiones generadas en la combustión del CSR, sólo se tendran en cuenta las emisiones de dióxido de carbono, nitrógeno y material particulado.

A continuación se presentan los datos de inventario para la etapa de secado que fueron tenidos en cuenta para cada tipo de ladrillo cerámico analizado. Tales datos se basan en los requerimientos de arcilla para la obtención de 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico propuesto.

Tabla 37. Datos de inventario para la etapa secado – Ladrillo cerámico tradicional

<b>Etapa de secado</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
Ladrillo húmedo	1.36900	Kg	Ladrillo seco	1.09700	Kg
Aire	0.18710	Kg	Rotura seca	0.03400	Kg
			Aire húmedo	1.33245	Kg
<b>Energía</b>					
Carbón	0.34656	MJ	Gases de chimenea húmedos	0.57818	MJ
Aire caliente	0.44678	MJ			
<b>Emisiones</b>					
			Vapor de agua	0.01132	Kg
			CO2	0.03440	Kg
			SO2	0.00020	Kg
			N2	0.14332	Kg
			O2	0.01046	Kg
			Material particulado	0.00130	Kg

Tabla 38. Datos de inventario para la etapa secado – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible

<b>Etapa de secado</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
Ladrillo húmedo	1.36900	Kg	Ladrillo seco	1.09700	Kg
Aire	0.18710	Kg	Rotura seca	0.03400	Kg
			Aire húmedo	1.33245	Kg
<b>Energía</b>					
CSR	0.34656	MJ	Gases de chimenea húmedos	0.57818	MJ
Aire caliente	0.44677	MJ			
<b>Emisiones</b>					
			CO2	0.02931	Kg
			N2	0.00182	Kg
			Material particulado	0.00400	Kg

Tabla 39. Datos de inventario para la etapa secado – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámic

<b>Etapa de secado</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
Ladrillo húmedo	1.36900	Kg	Ladrillo seco	1.09700	Kg
Aire	0.16970	Kg	Rotura seca	0.03400	Kg
			Aire húmedo	1.20850	Kg
<b>Energía</b>					
CSR	0.31432	MJ	Gases de chimenea húmedos	0.52439	MJ
Aire caliente	0.40527	MJ			
<b>Emisiones</b>					
			CO2	0.02658	Kg
			N2	0.00165	Kg
			Material particulado	0.00363	Kg

Tabla 40. Datos de inventario para la etapa secado – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica

<b>Etapa de secado</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
Ladrillo húmedo	1.36900	Kg	Ladrillo seco	1.09700	Kg
Aire	0.17998	Kg	Rotura seca	0.03400	Kg
			Aire húmedo	1.28174	Kg
<b>Energía</b>					
CSR	0.33337	MJ	Gases de chimenea húmedos	0.55617	MJ
Aire caliente	0.42972	MJ			
<b>Emisiones</b>					
			CO2	0.02819	Kg
			N2	0.00175	Kg
			Material particulado	0.00384	Kg

#### **g. Etapa de cocción**

##### **- Descripción de la etapa de cocción**

En este proceso se producen complejas reacciones asociadas a la composición

química y mineralógica de la pasta cerámica; tales reacciones ocurren en tres fases (Mesa Sectorial de Minería, 2003):

- *Fase de caldeo*: se elimina el agua higroscópica de la pasta cerámica; esta fase se considera terminada cuando la pieza alcanza una temperatura de 100 grados centígrados.
- *Fase de cocción*: se a temperaturas que oscilan entre 1,000 y 1,100 grados centígrados; una de la características más importantes de esta fase es la completación de las reacciones químicas y la formación de estructura característica que da fuerza al producto terminado.
- *Fase de enfriamiento*: la temperatura desciende de manera paulatina de modo que no se provoquen contracciones o fisuras en los ladrillos.

En la industria colombiana, el horno de cocción más empleado es el tipo Hoffman, el cual consiste en dos galerías paralelas, formadas por compartimientos contiguos cuyos extremos se unen por un pasafuegos. Son hornos continuos de alta producción, donde no se puede producir materiales vitrificados. En estos hornos el fuego se mueve a través del horno en dirección opuesta a las manecillas del reloj, este sistema permite obtener una alta eficiencia térmica y de producción, ya que el calor obtenido en la cámara de combustión se utiliza en el precalentamiento de las cámaras precedentes (Programa eficiencia energética en ladrilleras artesanales - EELA, 2011). El ciclo de secado de la pieza cerámica empleando esta tecnología tiene una duración de aproximadamente 7 días (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F).

#### **- *Datos de inventario en la etapa de cocción***

Para realizar el inventario de la etapa de cocción se tomaron datos de los balances de masa y energía desarrollados en el marco del proyecto de tecnologías limpias del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & la Universidad Industrial de Santander (S.F), bajo las siguientes consideraciones:

- El consumo de energía eléctrica asociado al consumo de ventiladores de entrada de aire de combustión no fueron tenidos en cuenta.
- En esta etapa no se tuvo en cuenta datos asociados al cambio de uso del suelo ni a la infraestructura requerida para la cocción de la arcilla necesaria para obtener 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico propuesto.
- El horno de cocción empleado para el proceso es un horno de cocción tipo Hoffman, el cual es el más empleado en la industria nacional (Programa eficiencia energética en ladrilleras artesanales - EELA, 2011).
- Para algunos ladrillos se sustituye el consumo de carbón por un combustible alternativo, CSR.
- Dado que no se cuenta con un estudio detallado de las emisiones generadas en la combustión del CSR, sólo se tendrán en cuenta las emisiones de dióxido de carbono, nitrógeno y material particulado.

A continuación se presentan los datos de inventario para la etapa de cocción que fueron tenidos en cuenta para cada tipo de ladrillo cerámico analizado. Tales datos se basan en los requerimientos de arcilla para la obtención de 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico propuesto.

Tabla 41. Datos de inventario para la etapa de cocción – Ladrillo cerámico tradicional

<b>Etapa de cocción</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
Ladrillo seco	1.09700	Kg	Ladrillo cocido	1.020	Kg
Aire	1.96485	Kg	Perdidas por cocción	0.077	Kg
<b>Energía</b>					
Carbón	1.65475	MJ	Aire caliente	0.44678	MJ
			Gases de chimenea	0.52125	MJ
<b>Emisiones</b>					
			Vapor de agua	0.05424	Kg
			CO2	0.16468	Kg
			SO2	0.00094	Kg
			N2	0.68706	Kg
			O2	0.05001	Kg
			Material particulado	0.00622	Kg

Tabla 42. Datos de inventario para la etapa de cocción – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible

<b>Etapa de cocción</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
Ladrillo seco	1.09700	Kg	Ladrillo cocido	1.0200	Kg
Aire	1.96480	Kg	Perdidas por cocción	0.0770	Kg
<b>Energía</b>					
CSR	1.65471	MJ	Aire caliente	0.4468	MJ
			Gases de chimenea	0.5212	MJ
<b>Emisiones</b>					
			CO2	0.1399	Kg
			N2	0.0087	Kg
			Material particulado	0.0191	Kg

Tabla 43. Datos de inventario para la etapa de cocción – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica

<b>Etapa de cocción</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
Ladrillo seco	1.09700	Kg	Ladrillo cocido	0.93873	Kg
Aire	1.78227	Kg	Perdidas por cocción	0.15827	Kg
<b>Energía</b>					
CSR	1.50099	MJ	Aire caliente	0.40527	MJ
			Gases de chimenea	0.47281	MJ
<b>Emisiones</b>					
			CO2	0.12694	Kg
			N2	0.00788	Kg
			Material particulado	0.01731	Kg

Tabla 44. Datos de inventario para la etapa de cocción – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica

<b>Etapa de cocción</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Materiales</b>					
Ladrillo seco	1.09700	Kg	Ladrillo cocido	0.93873	Kg
Aire	1.88980	Kg	Perdidas por cocción	0.15827	Kg
<b>Energía</b>					
CSR	1.59155	MJ	Aire caliente	0.42972	MJ
			Gases de chimenea	0.50134	MJ
<b>Emisiones</b>					
			CO2	0.13460	Kg
			N2	0.00835	Kg
			Material particulado	0.01836	Kg

#### ***h. Etapa de almacenamiento***

##### ***- Descripción de la etapa de almacenamiento y empaque***

Después del proceso de producción, generalmente a la salida del horno, las piezas cerámicas son sometidas a un proceso de clasificación en el que se obtienen

materiales de primera, de segunda, de tercera y material de rotura cocida o chamote, el cual es incorporado al proceso productivo. Finalmente los ladrillos cerámicos son transportados, casi siempre manualmente, y almacenados en las áreas que la empresa tiene destinada para dicha actividad, hasta su distribución (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander, S.F).

**- Datos de inventario en la etapa de almacenamiento y empaque**

Para realizar el inventario de la etapa de almacenamiento y empaque se tomaron datos de los balances de masa y energía desarrollados en el marco del proyecto de tecnologías limpias del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & la Universidad Industrial de Santander (S.F), bajo las siguientes consideraciones:

- Se supone que los movimientos internos desde la salida del horno de cocción hasta la zona de almacenamiento se realiza empleando vagonetas con el apoyo de la fuerza del personal de la planta.
- En esta etapa no se tuvo en cuenta datos asociados al cambio de uso del suelo ni a la infraestructura requerida para el almacenamiento y empaque de 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido, según las características del ladrillo cerámico propuesto.

A continuación se presentan los datos de inventario para la etapa de almacenamiento y empaque de 1 y 0.919 kilogramos de ladrillo cerámico cocido que fueron tenidos en cuenta para cada tipo de ladrillo cerámico analizado.

**Tabla 45. Datos de inventario para la etapa de almacenamiento – Ladrillo cerámico tradicional**

<i>Entrada</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>	<b>Empaque</b>		
			<i>Salida</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>
<b>Ladrillo cocido</b>	1.02	Kg	Ladrillo empacado	1	Kg
			Ladrillo cocido agrietado	0.02	Kg

**Tabla 46. Datos de inventario para la etapa de almacenamiento – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible**

<b>Empaque</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Ladrillo cocido</b>	1.02	Kg	Ladrillo empacado	1	Kg
			Ladrillo cocido agrietado	0.02	Kg

**Tabla 47. Datos de inventario para la etapa de almacenamiento – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámic**

<b>Empaque</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Ladrillo cocido</b>	0.93873	Kg	Ladrillo empacado	0.91873	Kg
			Ladrillo cocido agrietado	0.02	Kg

**Tabla 48. Datos de inventario para la etapa de almacenamiento – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica**

<b>Empaque</b>					
<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Ladrillo cocido</b>	0.93873	Kg	Ladrillo empacado	0.91873	Kg
			Ladrillo cocido agrietado	0.02	Kg

#### **4.2.1.2. Distribución hasta la obra**

##### **- Descripción del proceso**

La distribución de ladrillos cerámicos desde la ladrillera hasta la obra se realiza en camiones con capacidades para transportar entre 8 y 32 toneladas, dependiendo de la necesidad de producto y de la ubicación de la ladrillera y el cliente.

Aunque en el área de influencia del proyecto existen algunas ladrilleras, y siendo conservadores con los cálculos realizados en esta investigación, se partirá del

hecho que la industria de ladrillos cerámicos del Valle de Aburrá se encuentra ubicada principalmente en la zona sur de la región para tomar 25 kilómetros como la el radio de distancia entre la ladrillera y la ubicación del proyecto Tirol III, calle 64 con carrera 98, Sector Pajarito.

De igual manera, dado que el CSR que se está proponiendo emplear se produce en el municipio del Carmen de Viboral, se tomarán 70 kilómetros como la distancia entre el relleno sanitario, sitio de procesamiento del CSR, y la ladrillera. Para el caso de la ceniza volante, se tomaran 20 kilómetros como la distancia entre las empresas del sector textil en las que estas podrían ser generadas y la ladrillera.

- ***Datos de inventario para la etapa de distribución del ladrillo***

Para la obtención de los datos de inventario de esta etapa se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se realiza transporte desde la ladrillera hasta la obra
- El transporte está basado en un ladrillo cerámico de 6 y 4.7 kilogramos de peso, de acuerdo al tipo de ladrillo.
- El CSR es un residuo que es dispuesto en un relleno sanitario.
- Las cenizas volantes a emplear en el ladrillo cerámico son dispuestas en escombreras autorizadas.

A continuación se presentan los datos de inventario para la etapa distribución del ladrillo cerámico, el CSR y las cenizas volantes que fueron tenidos en cuenta para cada tipo de ladrillo cerámico analizado.

Tabla 49. Datos de inventario para la etapa de distribución – Ladrillo cerámico tradicional

<b>Distribución</b>					
<b>Ladrillo cerámico cocido</b>					
<b>Origen</b>	Valle de Aburrá	<b>Tipo de vehículo</b>	Camión	<b>Cantidad transportada (Kg)</b>	6
<b>Destino</b>	Medellín	<b>Capacidad (Ton)</b>	8	<b>Indicador (Ton/Km)</b>	4.00E-06
<b>Distancia (Km)</b>	25	<b>Combustible</b>	ACPM		

Tabla 50. Datos de inventario para la etapa de distribución – Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR como combustible

<b>Distribución</b>					
<b>Ladrillo cerámico cocido</b>					
<b>Origen</b>	Valle de Aburrá	<b>Tipo de vehículo</b>	Camión	<b>Cantidad transportada (Kg)</b>	6
<b>Destino</b>	Medellín	<b>Capacidad (Ton)</b>	8	<b>Indicador (Ton/Km)</b>	4.00E-06
<b>Distancia (Km)</b>	25	<b>Combustible</b>	ACPM		
<b>CSR</b>					
<b>Origen</b>	Carmen de Viboral	<b>Tipo de vehículo</b>	Camión	<b>Cantidad transportada (Kg)</b>	1,000
<b>Destino</b>	Valle de aburra	<b>Capacidad (Ton)</b>	8	<b>Indicador (Ton/Km)</b>	1.95E-06
<b>Distancia (Km)</b>	70	<b>Combustible</b>	ACPM		

Tabla 51. Datos de inventario para la etapa de distribución – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR en la pasta cerámica

<b>Distribución</b>					
<b>Ladrillo cerámico cocido</b>					
<b>Origen</b>	Valle de Aburrá	<b>Tipo de vehículo</b>	Camión	<b>Cantidad transportada (Kg)</b>	4.7
<b>Destino</b>	Medellín	<b>Capacidad (Ton)</b>	8	<b>Indicador (Ton/Km)</b>	3.67E-05
<b>Distancia (Km)</b>	25	<b>Combustible</b>	ACPM		
<b>CSR</b>					
<b>Origen</b>	Carmen de Viboral	<b>Tipo de vehículo</b>	Camión	<b>Cantidad transportada (Kg)</b>	1,000
<b>Destino</b>	Valle de aburra	<b>Capacidad (Ton)</b>	8	<b>Indicador (Ton/Km)</b>	3.03757E-06
<b>Distancia (Km)</b>	70	<b>Combustible</b>	ACPM		

Tabla 52. Datos de inventario para la etapa de almacenamiento – Ladrillo con CSR como combustible y 7% CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica

<b>Distribución</b>					
<b>Ladrillo cerámico cocido</b>					
<b>Origen</b>	Valle de Aburrá	<b>Tipo de vehículo</b>	Camión	<b>Cantidad transportada (Kg)</b>	4.7
<b>Destino</b>	Medellín	<b>Capacidad (Ton)</b>	8	<b>Indicador (Ton/Km)</b>	3.67E-05
<b>Distancia (Km)</b>	25	<b>Combustible</b>	ACPM		
<b>CSR</b>					
<b>Origen</b>	Carmen de Viboral	<b>Tipo de vehículo</b>	Camión	<b>Cantidad transportada (Kg)</b>	1,000
<b>Destino</b>	Valle de Aburrá	<b>Capacidad (Ton)</b>	8	<b>Indicador (Ton/Km)</b>	2.93071E-06
<b>Distancia (Km)</b>	70	<b>Combustible</b>	ACPM		

<b>Cenizas volantes</b>					
<b>Origen</b>	Valle de Aburrá	Tipo de vehiculo	Camión	Cantidad transportada (Kg)	1,000
<b>Destino</b>	Valle de Aburrá	Capacidad (Ton)	8	Indicador (Ton/Km)	1.161E-05
<b>Distancia (Km)</b>	20	Combustible	ACPM		

#### **4.2.2. Impactos ambientales en el ciclo de vida de un ladrillo**

Para establecer los impactos ambientales generados en el ciclo de vida de 6 y 4.7 kilogramos de ladrillo cocido, dependiendo del tipo de ladrillo analizado, se realizaron algunas estimaciones y se tomaron datos (consumo de materias primas, energía y recursos, generación de emisiones), existentes en diferentes fuentes bibliográficas como el proyecto realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & la Universidad Industrial de Santander (S.F). Tales datos fueron convertidos en puntos de impacto ambiental, a través del uso de 11 categorías establecidas en la metodología ECO INDICADOR 99, empleando la base de datos ECOINVENT v2.2 y el software SIMAPRO V7.2.

La 11 categorías establecidas per ECO INDICADOR 99 que fueron empleadas para la evaluación de los impactos ambientales asociados a los ladrillos propuestos por esta investigación son:

- Cancerígenos
- Respirables Orgánicos
- Respirables Inorgánicos
- Cambio Climático
- Radiación
- Capa de Ozono
- Ecotoxicidad
- Acidificación/ Eutrofización
- Uso del suelo
- Minerales

- Combustibles Fósiles

A continuación se presentan los puntos obtenidos para cada una de las categorías para las etapas de producción y distribución de cada uno de los ladrillos cerámicos cocidos considerados en este estudio.

**Tabla 53. Datos del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico tradicional con ladrillos cerámicos modificados a partir del uso de CSR en la pasta cerámica y/o como combustibles**

Categoría de impacto	Unidad	Ladrillo tradicional	Ladrillo con CSR como combustible	Ladrillo con 7% CSR y 20% cenizas en pasta y CSR como combustible	Ladrillo con 7% CSR en pasta y CSR como combustible
<b>Total</b>	<b>Pt</b>	<b>0.020724</b>	<b>0.01975</b>	<b>0.01529</b>	<b>0.01488</b>
<b>Cancerígenos</b>	Pt	0.000976	0.00025	0.00022	0.00020
<b>Respirables orgánicos</b>	Pt	0.000005	0.00000	0.00000	0.00000
<b>Respirables inorgánicos</b>	Pt	0.002764	0.00262	0.00192	0.00185
<b>Cambio climático</b>	Pt	0.005588	0.00478	0.00345	0.00359
<b>Radiación</b>	Pt	0.000003	0.00000	0.00000	0.00000
<b>Capa de ozono</b>	Pt	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000
<b>Eco toxicidad</b>	Pt	0.000366	0.00019	0.00018	0.00015
<b>Acidificación/ Eutrofización</b>	Pt	0.000379	0.00039	0.00029	0.00028
<b>Usos del suelo</b>	Pt	0.000621	0.00063	0.00035	0.00038
<b>Minerales</b>	Pt	0.000068	0.00007	0.00006	0.00006
<b>Combustibles fósiles</b>	Pt	0.009955	0.01081	0.00882	0.00835

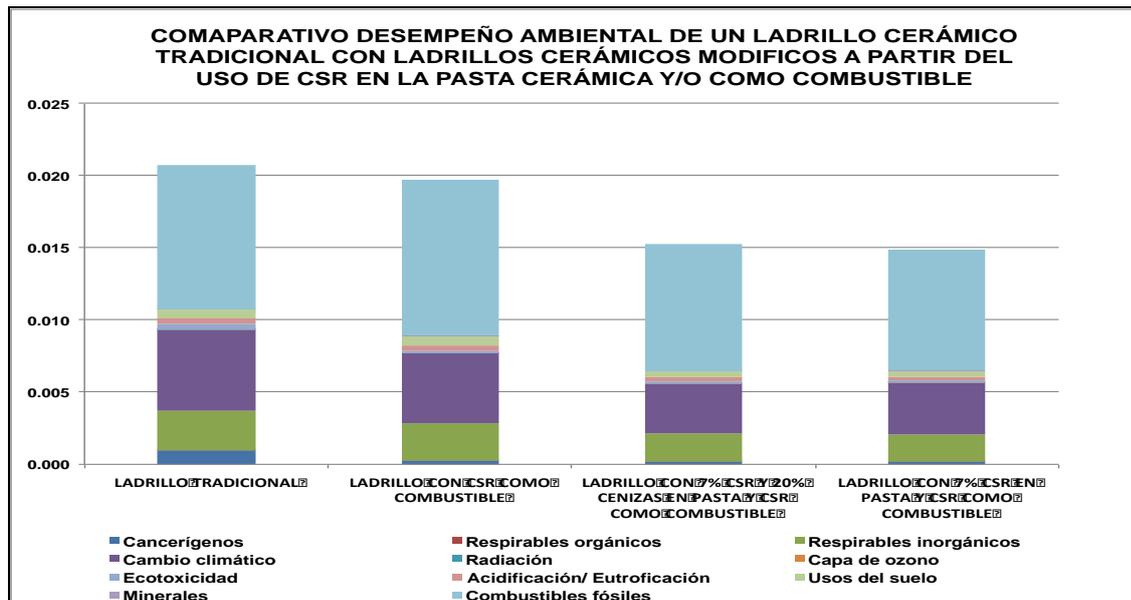


Figura 11. Comparativo del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico tradicional con ladrillos cerámicos modificados a partir del uso de CSR en la pasta cerámica y/o como combustibles

Tabla 54. Datos del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico tradicional

Categoría de impacto	Unidad	Total	Producción ladrillo cerámico de 6 Kg	Distribución ladrillo cerámico de 6 Kg
<b>Total</b>	<b>Pt</b>	<b>0.020724</b>	<b>0.01712</b>	<b>0.00361</b>
<b>Cancerígenos</b>	Pt	0.000976	0.00092	0.00005
<b>Respirables orgánicos</b>	Pt	0.000005	0.00000	0.00000
<b>Respirables inorgánicos</b>	Pt	0.002764	0.00213	0.00063
<b>Cambio climático</b>	Pt	0.005588	0.00544	0.00015
<b>Radiación</b>	Pt	0.000003	0.00000	0.00000
<b>Capa de ozono</b>	Pt	0.000000	0.00000	0.00000
<b>Eco toxicidad</b>	Pt	0.000366	0.00029	0.00007
<b>Acidificación/ Eutrofización</b>	Pt	0.000379	0.00026	0.00012
<b>Usos del suelo</b>	Pt	0.000621	0.00057	0.00005
<b>Minerales</b>	Pt	0.000068	0.00005	0.00002
<b>Combustibles fósiles</b>	Pt	0.009955	0.00744	0.00252

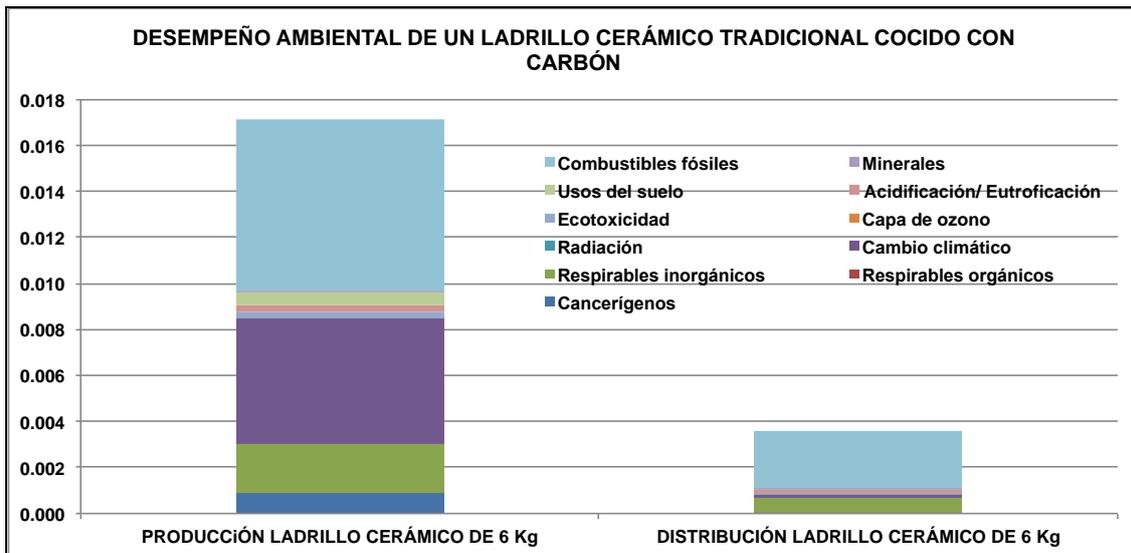


Figura 12. Comparativo del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico tradicional cocido con carbón

Tabla 55. Datos del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR

Categoría de impacto	Unidad	Total	Producción ladrillo cerámico de 6 Kg con CSR como combustible	Distribución ladrillo cerámico de 6 Kg con CSR como combustible
<b>Total</b>	<b>Pt</b>	<b>0.019748</b>	<b>0.01614</b>	<b>0.00361</b>
Cancerígenos	Pt	0.000248	0.00019	0.00005
Respirables orgánicos	Pt	0.000005	0.00000	0.00000
Respirables inorgánicos	Pt	0.002620	0.00199	0.00063
Cambio climático	Pt	0.004782	0.00464	0.00015
Radiación	Pt	0.000003	0.00000	0.00000
Capa de ozono	Pt	0.000000	0.00000	0.00000
Eco toxicidad	Pt	0.000187	0.00012	0.00007
Acidificación/ Eutrofización	Pt	0.000389	0.00027	0.00012
Usos del suelo	Pt	0.000632	0.00058	0.00005
Minerales	Pt	0.000073	0.00006	0.00002
Combustibles fósiles	Pt	0.010809	0.00829	0.00252

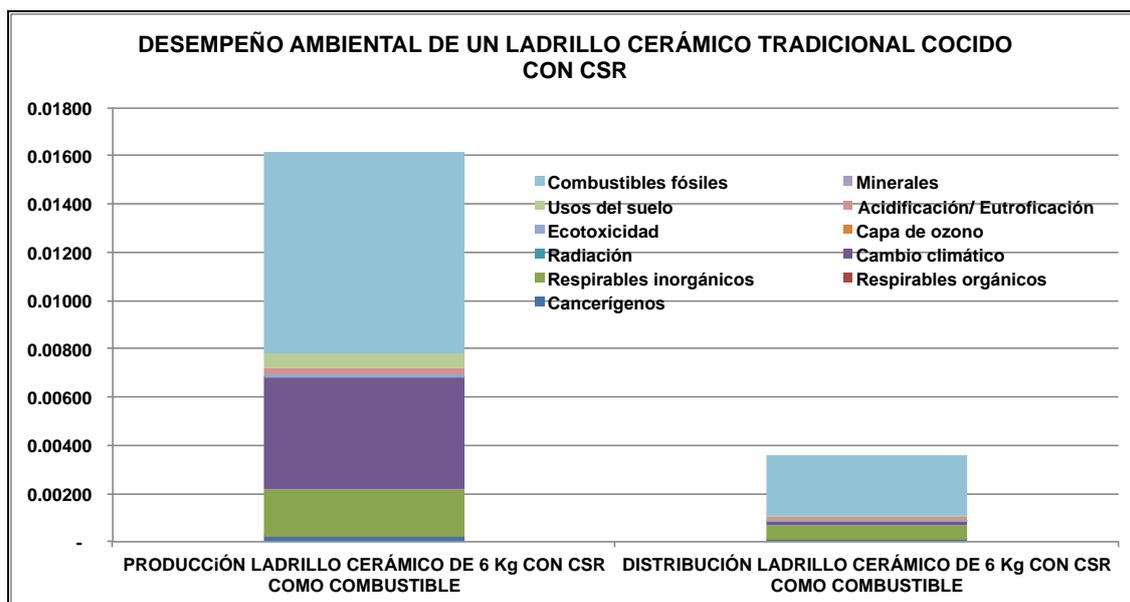


Figura 13. Comparativo del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR

Tabla 56. Datos del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico con 7% CSR y 20% cenizas volantes en la pasta cerámica y CSR como combustible

Categoría de impacto	Unidad	Total	Producción ladrillo cerámico de 4.7 Kg con 7% CSR y 20% cenizas volantes en la pasta cerámica y CSR como combustible	Transporte ladrillo cerámico de 4.7 Kg con 7% CSR y 20% cenizas volantes en la pasta cerámica y CSR como combustible
<b>Total</b>	<b>Pt</b>	<b>0.015292</b>	<b>0.012467</b>	<b>0.002825</b>
Cancerígenos	Pt	0.000218	0.000176	0.000043
Respirables orgánicos	Pt	0.000004	0.000003	0.000001
Respirables inorgánicos	Pt	0.001917	0.001423	0.000494
Cambio climático	Pt	0.003445	0.003331	0.000115
Radiación	Pt	0.000003	0.000002	0.000001
Capa de ozono	Pt	0.000000	0.000000	0.000000
Eco toxicidad	Pt	0.000181	0.000125	0.000056
Acidificación/ Eutrofización	Pt	0.000290	0.000199	0.000092
Usos del suelo	Pt	0.000348	0.000308	0.000040
Minerales	Pt	0.000063	0.000050	0.000013
Combustibles fósiles	Pt	0.008821	0.006850	0.001971

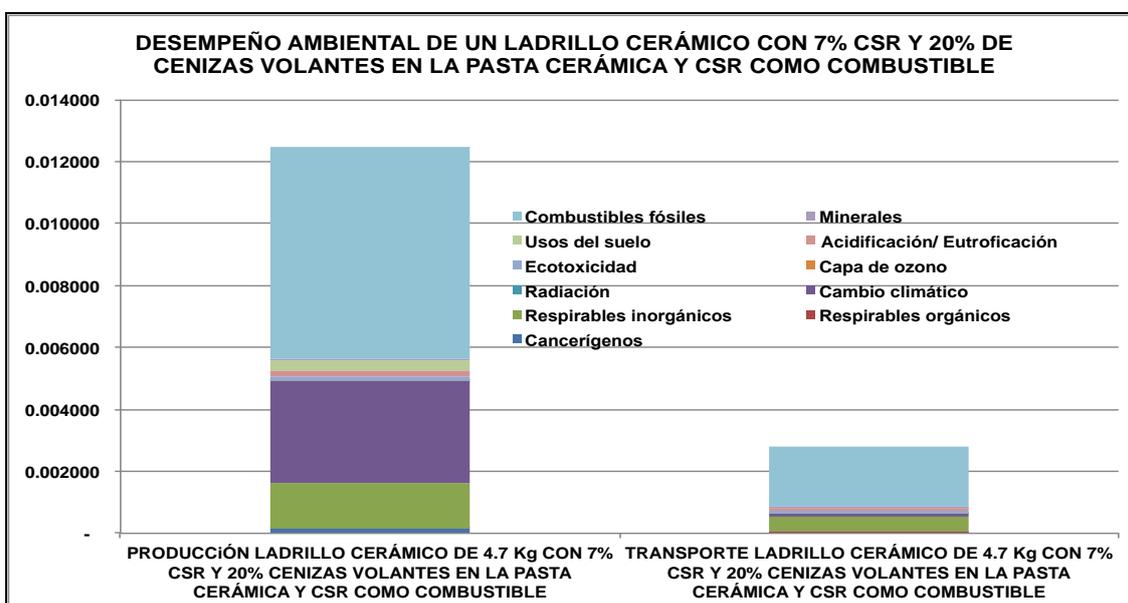
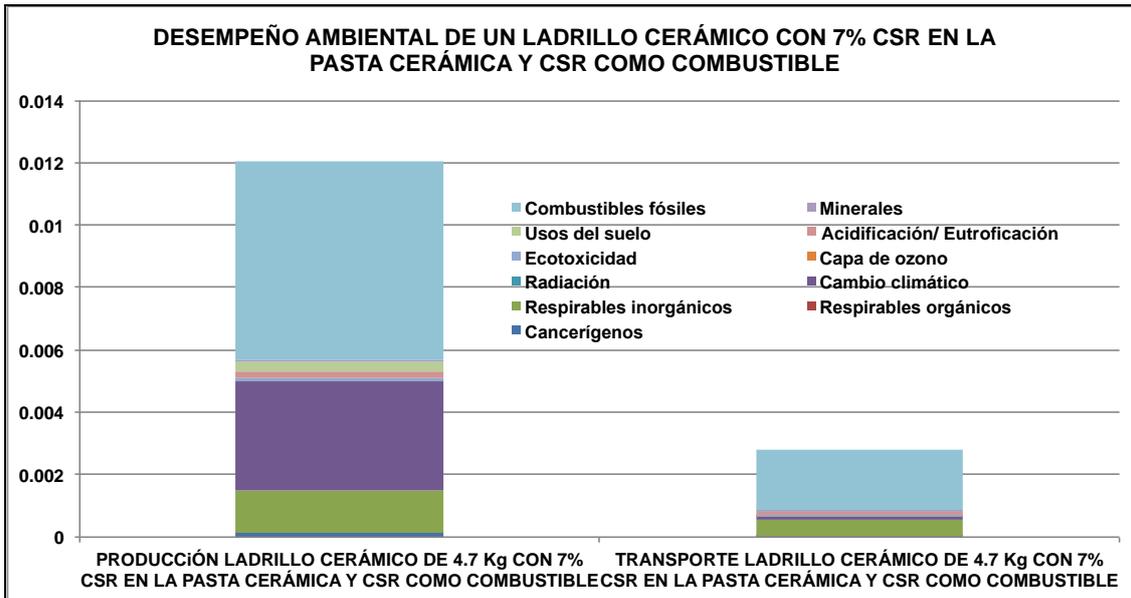


Figura 14. Comparativo del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico con 7% CSR y 20% cenizas volantes en la pasta cerámica y CSR como combustible

Tabla 57. Datos del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico con 7% CSR en la pasta cerámica y CSR como combustible

Categoría de impacto	Unidad	Total	Producción ladrillo cerámico de 4.7 Kg con 7% CSR en la pasta cerámica y CSR como combustible	Transporte ladrillo cerámico de 4.7 Kg con 7% en la pasta cerámica y CSR como combustible
<b>Total</b>	<b>Pt</b>	<b>0.014877897</b>	<b>0.012053292</b>	<b>0.002824606</b>
Cancerígenos	Pt	0.000197971	0.000155213	4.28E-05
Respirables orgánicos	Pt	3.52E-06	2.77E-06	7.47E-07
Respirables inorgánicos	Pt	0.00185455	0.001360782	0.000493768
Cambio climático	Pt	0.003592974	0.003478349	0.000114625
Radiación	Pt	2.53E-06	1.35E-06	1.18E-06
Capa de ozono	Pt	1.84E-07	9.45E-08	8.94E-08
Eco toxicidad	Pt	0.00015337	9.74E-05	5.60E-05
Acidificación/ Eutrofización	Pt	0.000278503	0.000186936	9.16E-05
Usos del suelo	Pt	0.000381888	0.000341892	4.00E-05
Minerales	Pt	5.76E-05	4.47E-05	1.29E-05
Combustibles fósiles	Pt	0.008354812	0.006383821	0.001970991



**Figura 15. Datos del desempeño ambiental de un ladrillo cerámico con 7% CSR en la pasta cerámica y CSR como combustible**

### 4.3. Externalidades en el contexto de los ladrillos modificados

La teoría de externalidades hace referencia a todos los costos y beneficios que recaen sobre la sociedad y el medio ambiente como consecuencia de una actividad económica, los cuales se caracterizan por no estar incluidos en el precio del bien o servicio que los genera; así, estos no interfieren en los costos y beneficios de quien los produce, pero si suponen un coste social, materializado, generalmente, en forma de impactos ambientales y/socioeconómicos (Martinez de Anguita, 2004).

En el contexto de esta investigación, se consideraran los siguientes beneficios sociales y ambientales derivados de la fabricación y el uso de ladrillos modificados:

- Disminución de efectos en la población asociados con la reducción de emisiones de dióxido de carbono
- Disminución del agotamiento de recursos naturales no renovables y mayor disponibilidad para la población por la reducción del consumo de arcilla.
- Disminución del agotamiento de recursos naturales no renovables y mayor

disponibilidad para la población por la reducción del consumo de combustibles fósiles.

Para ello, se tomará como base una ladrillera con la siguiente producción, ver Tabla 58:

**Tabla 58. Producción de ladrillos en la empresa base**

Descripción	Unidad	Total
Ladrillos producidos por mes	Unidades	50,000
Ladrillos producidos por año	Unidades	600,000

Adicionalmente se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- De acuerdo a lo establecido por el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático del 2006, los gobiernos deberán invertir 50 USD por tonelada de dióxido de carbono que es emitida.
- El espesor de la capa de tierra de las áreas de explotación de arcilla es de 30 metros.
- La empresa ladrillera obtiene su materia prima (arcilla) de una mina propia en la que el proceso de extracción tiene un costo aproximado de \$4,500 por tonelada extraída y \$2,500 por tonelada transportada (datos suministrados por el señor Santiago Medina, propietario de Alfarera Pueblo Viejo<sup>3</sup>).
- La empresa ladrillera destina \$250 por tonelada extraída para la restauración de las áreas de explotación (datos suministrados por el señor Santiago Medina, propietario de Alfarera Pueblo Viejo).

<sup>3</sup> Alfarera Pueblo Viejo cuenta con más de siete generaciones en la industria de los ladrillos y experiencia con diferentes empresas del sector, fue conformada en 1998 en la planta de la antigua Ladrillera San Fernando que data de 1897. Es una empresa comprometida con la producción de productos cerámicos de gran calidad, que salió al mercado con pisos y enchapes artesanales, que apuntaron al mercado de las construcciones campestres. Con el pasar de los años complementó su portafolio de productos con los pisos y enchapes coloniales y los ladrillos de fachada terracota y arena.

Ofrece una amplia gama de productos en gres para satisfacer las múltiples necesidades del sector constructo y está comprometido con los más altos estándares de calidad, servicio y cuidado del medio ambiente.

Ver <http://www.alfarera-puebloviejo.com/index.php>

- El carbón empleado en los procesos de secado y cocción del ladrillo es obtenido de minas ubicadas en un perímetro de 20 kilómetros a la redonda del Valle de Aburrá y tiene un costo aproximado de \$150.000 por tonelada

#### **4.3.1. Disminución de emisiones de dióxido de carbono**

El uso de CSR como combustible y como parte de la pasta cerámica contribuye con la reducción de las emisiones de dióxido de carbono, que son emitidas en los procesos tradicionales secado y cocción del ladrillo. La Tabla 59 presenta las misiones de dióxido de carbono reducidas (ton CO<sub>2</sub> eq) y los costos evitados por cambio climático de una ladrillera con una producción anual de 600,000 ladrillos, según tipo de ladrillo producido:

**Tabla 59. Emisiones de dióxido de carbono equivalente y costos evitados por cambio climático**

<b>Descripción</b>	<b>Emisiones reducidas Ton CO2 eq/año</b>	<b>Costos evitados por cambio climático USD/año</b>
<b>Ladrillo cerámico tradicional</b>	0.00	\$0
<b>Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR</b>	859	\$42,974
<b>Ladrillo cerámico con 7% de CSR en la pasta cerámica y cocido CSR</b>	695	\$34,757
<b>Ladrillo cerámico con 7% de CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica y cocido CSR</b>	552	27,604

#### **4.3.2. Disminución del consumo de arcilla**

Como ya se mencionó, la arcilla es la principal materia prima en la producción de ladrillos cerámicos. Su extracción y transporte, así como los procesos de restauración asociados a la recuperación de las áreas degradadas y/o intervenidas por la extracción de la arcilla conllevan a la generación de costos que podrían ser

reducidos a través de la sustitución de arcilla por materiales alternativos en la pasta cerámica, como es el caso del CSR propuesto en esta investigación. La Tabla 60 presenta los ahorros asociados a los volúmenes de arcilla reducidos, en términos de la explotación y transporte, y a la restauración de las áreas degradadas por el proceso de minería de esta:

**Tabla 60. Ahorros por explotación y transporte de la arcilla extraída y por restauración de áreas de extracción de arcilla**

Descripción	Volumen de arcilla reducida Ton/año	Ahorro costos explotación y transporte COP/año	Ahorro costos de restauración COP/año
Ladrillo cerámico tradicional	0	\$0	\$0
Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR	0	\$0	\$0
Ladrillo cerámico con 7% de CSR en la pasta cerámica y cocido CSR	783	\$5,484,254	\$195,866
Ladrillo cerámico con 7% de CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica y cocido CSR	1,465	\$10,258,483	\$366,374

#### **4.3.3. Disminución del consumo de combustibles fósiles**

El uso de combustibles fósiles, como el carbón, en los procesos de producción de ladrillos cerámicos, conlleva a la generación de costos que son contabilizados directamente en el proceso de producción de estos. De igual manera, existen algunos costos que no afectan de forma directa la producción de estos, como son los costos de la explotación del carbón y los costos asociados a los procesos de restauración de áreas de extracción del mismo. La Tabla 61 describe los ahorros asociados a la sustitución de este por combustibles alternativos, como el CSR propuesto en este proceso de investigación, sobre los costos directos del proceso de producción de ladrillos cerámicos por consumo de carbón.

**Tabla 61. Ahorros asociados al consumo de carbón**

Descripción	Reducción consumo	Ahorro costos
-------------	-------------------	---------------

	de carbón Ton/año	consumo de carbón COP/año
<b>Ladrillo cerámico tradicional</b>	0	\$0
<b>Ladrillo cerámico tradicional cocido con CSR</b>	391	\$58,600,451
<b>Ladrillo cerámico con 7% de CSR en la pasta cerámica y cocido CSR</b>	316	\$47,396,119
<b>Ladrillo cerámico con 7% de CSR y 20% de cenizas volantes en la pasta cerámica y cocido CSR</b>	251	\$37,642,368

## 5. Conclusiones y recomendaciones

- En el objetivo de contribuir con el mejoramiento de las condiciones de sostenibilidad para la VIP en la ciudad de Medellín, uno de los aspectos relevantes es lo concerniente con la eficiencia energética de la vivienda. Esta está condicionada por consideraciones de diseño, materiales empleados y asuntos de la ocupación tales como aparatos eléctricos y electrónicos, mobiliario y habitantes.
- En el presente trabajo se hizo una orientación del análisis del desempeño energético y ambiental de las VIP hacia los materiales empleados en la construcción de la misma. Cerca del 90% de los materiales usados lo constituyen materiales de tipo cerámico y vidrio; entre los cuales sobresale el empleo del ladrillo con una contribución entre el 9 y el 10%.
- Para la evaluación del desempeño energético de la VIP en cuanto a materiales, se realizaron cálculos energéticos para la producción de ladrillos tradicionales y ladrillos modificados. Se encontró que los requerimientos energéticos y por tanto la huella de carbono de ladrillos modificados es considerablemente menor, entre un 4 y un 9% de reducción.
- Para la evaluación del desempeño ambiental se elaboraron ACV para ladrillo

tradicional y ladrillos modificados. La reducción de impactos ambientales es de cerca del 25% con relación al ladrillo tradicional, cuando se emplean ladrillos modificados y procesados con combustibles renovables. Se destaca la reducción de impactos asociados a consumo de recursos (combustibles fósiles) y efectos asociados con el cambio climático.

- Los ladrillos modificados propuestos en este trabajo corresponden a tres tipologías: la primera, un ladrillo tradicional cocido con CSR; el segundo un ladrillo con sustitución del 7% de arcilla por CSR y cocido con CSR y por último un ladrillo con sustitución del 7% y 20% de arcilla con CSR y ceniza volante, respectivamente, y cocido con CSR. Estas modificaciones proponen un ahorro en el consumo de recursos naturales no renovables como es el caso de la arcilla y el carbón que tradicionalmente se emplean en esta industria. Así mismo se promueve la recuperación, el reciclaje y la reintegración de recursos alternativos provenientes de fuentes secundarias; como es el caso de los residuos sólidos urbanos considerados en el presente trabajo.
- Otros recursos alternativos con prestaciones semejantes podrían igualmente ser explorados en otros trabajos. De esta manera la estrategia de empleo de ladrillos modificados en las VIP contribuiría igualmente con la reducción de problemas de carácter ambiental asociados con la gestión, el tratamiento y la eliminación de residuos urbanos e industriales, mientras se optimiza el aprovechamiento y uso de recursos no renovables.
- Además, la propuesta de empleo de ladrillos modificados genera un conjunto de externalidades, entre las que se destacan innovación y desarrollo tecnológico, nuevos procesos industriales y modelos de negocio, mayor rentabilidad y competitividad empresarial, responsabilidad social, disminución en la generación de impactos ambientales como de la contaminación del aire

y en los efectos en la salud pública asociados a estos.

- Sin embargo, aunque en el contexto internacional el uso de ladrillos modificados está inserto en el mercado de la construcción, el desarrollo de los mismos en Medellín y en Colombia es, por el momento, una propuesta investigativa; si bien ha sido suficientemente conocida y probada por el sector ladrillero y de la industria de la construcción. La actual normatividad técnica Colombiana para este tipo de productos restringe la inserción de materiales sustitutos en la producción de los ladrillos, a pesar de ser un hecho técnico y económicamente viable.
- Las VIP de la ciudad son promovidas principalmente por las agencias del gobierno local, en coordinación con las directrices nacionales. La concepción de proyectos de VIP sigue criterios y parámetros muy convencionales que no dan pie ni promueven la adopción de este tipo de innovaciones. Se evidencia una falta de conocimiento en los equipos de diseño y gestión de proyectos de estas entidades, limitando la inserción de soluciones sostenibles e innovadoras probadas y adoptadas suficientemente en el contexto internacional.
- Es imperativo reestructurar la normatividad técnica del ladrillo con el fin de posibilitar el uso de ladrillos modificados en la construcción, no sólo de VIP sino en edificaciones en general. Esto puede hacerse inicialmente para ladrillos no estructurales o portantes. Igualmente es necesario elevar el nivel de conocimiento de diseñadores, arquitectos y funcionarios responsables de este tipo de obras.

## Anexos

### Anexo 1. Calculos de los requerimientos energéticos en la producción de los ladrillos

Datos	Valor	Unidades
Poder calorífico CSR	3500	Kcal/kg CSR
Calor estimado que se aprovechará del CSR	50%	
Agua de construcción en la arcilla	0.08	Kg H2O/ Kg arcilla
Calor de evaporación del agua	600	Kcal/kg H2O
Calor específico	0.24	Kcal/kg °C
Calor de calentamiento	240.00	Kcal/Kg arcilla
Temperatura esperada de quemado	1000	°C
Poder calorífico carbón	5500	Kcal/kg CSR

Tipo de ladrillo	Arcilla a cocer (Kg)
Ladrillo tradicional	1.161
Ladrillo con 7% CSR	1.08
Ladrillo con 7% CSR + 20% Cenizas Volátiles	0.848

<b>Cálculos</b>	<b>Ladrillo tradicional</b>	<b>Ladrillo con 7% CSR</b>	<b>Ladrillo con 7% CSR + 20% Cenizas Volátiles</b>
Calor de reacción (Kcal)	55.73	51.84	40.704
Calor aportado por CSR (Kcal)		132.3	103.88
Calor de calentamiento (Kcal)	278.64	259.2	203.52

<b>Balance de calor por arcilla cocida</b>	<b>Ladrillo tradicional</b>	<b>Ladrillo con 7% CSR</b>	<b>Ladrillo con 7% CSR + 20% Cenizas Volátiles</b>
Calor de calentamiento (Kcal)	278.64	259.2	203.52
Calor de reacción (Kcal)	55.73	51.84	40.704
Perdida de calor A TRAVÉS PAREDES(Kcal)	70	70	66.5
Calor sensible DE LOS HUMOS(Kcal)	120	120	120
<b>Total Balance (Kcal)</b>	<b>524.37</b>	<b>501.04</b>	<b>430.724</b>

<b>Consumo de combustible por unidad de arcilla cocida</b>	<b>Ladrillo tradicional</b>	<b>Ladrillo con 7% CSR</b>	<b>Ladrillo con 7% CSR + 20% Cenizas Volátiles</b>
Carbón (Kg Carbón/Ton arcilla)	95.34	91.10	78.31
CSR (Kg CSR/kg arcilla)	0.15	0.14	0.12

## Anexo 2. Calculos externalidades

Datos generales	
Producción mensual (Ladrillos/mes)	50,000
Producción anual (Ladrillos/año)	600,000
Inversión en cambio climático (50 USD/ton CO2 emitida)	\$50
Costo de extracción y transporte de arcilla (\$/ton arcilla)	\$7,000
Costo de restauración por extracción de arcilla (\$/ton arcilla)	\$250
Costo carbón (\$/ton)	\$150,000

Cálculos base					
Tipo de ladrillo	Peso ladrillo cocido (kg)	Requerimientos de arcilla (kg/ladrillo)	Relación arcilla/ladrillo	Peso del ladrillo fabricado	Consumo de carbón (kg/Ton arcilla cocida)
Ladrillo tradicional	1.02	1.16	1.14	6.00	95.34
Ladrillo con 7% CSR, cocido con CSR	0.92	1.08	1.18	4.70	0.00
Ladrillo con 7% CSR + 20% cenizas volantes, cocido con CSR	0.92	0.86	0.93	4.70	0.00

Tipo de ladrillo	Peso ladrillos producidos (Ton/año)	Peso total arcilla (Ton/año)	Ahorro carbón (Ton carbón/Ton arcilla)	Reducción de emisiones de CO2 Ton/Ton arcilla
Ladrillo tradicional, cocido con carbón	3,600	4,098	0.000	0.000
Ladrillo tradicional, cocido con CSR	3,600	4,098	0.095	0.210
Ladrillo con 7% CSR, cocido con CSR	2,820	3,314	0.095	0.210
Ladrillo con 7% CSR + 20% cenizas volantes, cocido con CSR	2,820	2,632	0.095	0.210

Emisiones		
Tipo de ladrillo	Emisiones reducidas Ton CO2 eq	Costos evitados por cambio climático \$/año
Ladrillo tradicional, cocido con carbón	0	\$0
Ladrillo tradicional, cocido con CSR	859	\$42,974
Ladrillo con 7% CSR, cocido con CSR	695	\$34,757
Ladrillo con 7% CSR + 20% cenizas volantes, cocido con CSR	552	\$27,604

<b>Consumo de arcilla</b>			
<b>Tipo de ladrillo</b>	<b>Volumen de arcilla reducida (ton/año)</b>	<b>Ahorro en costos de explotación y transporte (\$/año)</b>	<b>Ahorro en costos de restauración (\$/año)</b>
<b>Ladrillo tradicional, cocido con carbón</b>	0.00	\$0	\$0
<b>Ladrillo tradicional, cocido con CSR</b>	0.00	\$0	\$0
<b>Ladrillo con 7% CSR, cocido con CSR</b>	783.46	\$5,484,254	\$195,866
<b>Ladrillo con 7% CSR + 20% cenizas volantes, cocido con CSR</b>	1,465.50	\$10,258,484	\$366,374

<b>Consumo de carbón</b>		
<b>Tipo de ladrillo</b>	<b>Reducción en consumo de carbón Ton /año</b>	<b>Ahorro por consumo de carbón COP/año</b>
<b>Ladrillo tradicional, cocido con carbón</b>	0.00	\$0
<b>Ladrillo tradicional, cocido con CSR</b>	390.67	\$58,600,451
<b>Ladrillo con 7% CSR, cocido con CSR</b>	315.97	\$47,396,119
<b>Ladrillo con 7% CSR + 20% cenizas volantes, cocido con CSR</b>	250.95	\$37,642,368

## 6. Bibliografía

Acosta, D. (2000). La mampostería de bloques de suelo-cemento: ¿tecnología apropiada para la producción masiva de viviendas de interés social? *Tecnología y Construcción* , 16 (1), 19 - 30.

Alavedra, P., Domínguez, J., Gonzalo, E., & Serra, J. (1998). La construcción sostenible. El estado de la cuestión. (I. J. Herrera, Ed.) *Informes de la construcción* , 48 (451), 41 - 47.

Alcaldía de Medellín. (2012). *Proyecto de Acuerdo Plan de Desarrollo "Medellín un hogar para la vida" 2012-2015*. Alcaldía de Medellín, Medellín.

Aranda Usón, A., Díaz de Garayo, S., Scarpellini, S., & Zabalza Bribián, I. (2014). Impacto de los materiales de construcción, análisis de ciclo de vida. *EcoHabitar* (43).

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2012). Línea 5. Vivienda y hábitat sostenible. In *Hacia una gestión sostenible e integral del territorio metropolitano* (pp. 81-85). Medellín, Antioquia, Colombia: Gente visual publicitaria.

Bancrofft, R. (26 de agosto de 1998). *Ecomateriales de construcción: una contribución a la salud y a la vivienda*. Retrieved 08 de noviembre de 2013 from Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología Centro Colaborador de la OMS en el Área de Salud de la Vivienda: <http://www.bvsde.paho.org/vivi/cd/inhem2/reunion/tccomat.htm#titulo>

Bedoya Montoya, C. M. (2009). ELECS 2009: La vivienda de interés social sostenible como política pública en Colombia . *V Encuentro Nacional y III Encuentro Latino-Americano sobre edificaciones y comunidades sustentables*, (pp. 1 - 5).

Bobadilla, A., Bustamante, W., García Alvarado, R., González, A., & Muñoz, C. (2014). Características relevantes de la simulación energética de vivienda unifamiliar. *Informes de la Cosntrucción* , 66 (533).

Bodach, S., & Hamhaber, J. (2010). Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil. *Elservier Ltda* , 38 (12), 7898-7910.

Cabo Laguna, M. (2011). *Ladrillo ecológico con material sostenible para la construcción*. Tesis, Universidad Pública de Navarra, Departamento de proyectos e ingeniería rural, Ekaina.

Castro Pelaez, K., Pelaez Jaramillo, C. A., Restrepo Zapata, G., Rivera Echavarría, K., Ruiz Pulgarín, A., Tamayo Londoño, A., et al. (2014). Anaerobic digestion as a technology to optimize the manabement of municipal organic wast in Colombia. Medellín, Antioquia.

Centro Nacional de Producción Más Limpia. (2013). *Perfil Técnico Ambiental para Ladrillos*. Medellín.

Clay Brick Association. (2002). *Clay brick manufacture: Part 1* (1ra edición ed.). Halfway, Midrand, South Africa.

Consejo Construcción Verde España. (16 de marzo de 2011). *Consejo Construcción Verde España*. Retrieved 13 de octubre de 2013 from Tendencias de la certificación sostenible de edificios: <http://www.spaingbc.org/detalle-noticia.php?id=12>

Comité de Habitat. (2003). *Política de hábitat y seguridad humana* . Documento interno de discusión, Alcaldía de Bogotá, Santa Fé de Bogotá.

ecoinvent Association. (2007). *ecoinvent Centre - Swiss Centre for Life Cycle Inventories*. Retrieved 13 de noviembre de 2014 from <http://www.ecoinvent.ch>

Elias, X. (2013). *Uso de residuos para la fabricación de materiales modificados aislantes*. Medellín.

Elias, X. (S.F.). *Medidas de ahorro energético, balances, aislantes y refractarios*. Barcelona.

Elias, X. (2009). *Reciclaje de residuos industriales, residuos sólidos urbano y fangos de depuradorea* (2a edición ed.). (X. Elias, Ed.) Madrid: Ediciones Días de Santos.

De Buen, O. (2012). *Global Cool Cities Alliance*. From Eficiencia energética en edificios en México: un acuerdo histórico : <http://www.globalcoolcities.org/wp-content/uploads/2012/03/Odon-de-Buen.pdf>

De Hoz Onrubia, J., Maldonado Ramos, L., & Vela Cossio, F. (2003). *Diccionario de construcción tradicional: tierra*. San Sebastián: Editorial Nerea S.A.

De Schiller, S., Gomez , V., Goijberg, N., & Treviño, C. (2003). Edificación sustentable: consideraciones para la calificación del hábitat construido en el contexto regional latinoamericano. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* , 7 (1), 05.13-05.18.

FADECO Promotores. (2008). Sección IV. El impacto ambiental en la edificación: criterios para una construcción sostenible. In F. Promotores, *Sistemas de calificación energética y análisis medioambiental en la promoción de vivienda en Andalucía*. Andalucía.

Galán, E., & Aparicio, P. (S.F). *Materias primas para la industria cerámica*.

Seminario, Universidad de Sevilla, Sevilla.

Gestión, I. S. (2009). Bloque 1: Análisis de ciclo de vida. In H. S. Gestión (Ed.), *Análisis de ciclo de vida y huella de carbono: dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto*. Alameda de Urquijo.

Gestión, I. S. (2009). Bloque 1: Análisis de ciclo de vida. In I. S. Gestión, *Análisis de ciclo de vida y huella de carbono: dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto* (pp. 3-26). Bilbao.

Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares. (2014). *Reporte de resultados*. Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Instituto de Química, Medellín.

IHOBE Sociedad Pública de Gestión Ambiental. (2009). Bloque 1: Análisis de ciclo de vida. In I. S. Ambiental, *Análisis de ciclo de vida y huella de carbono: dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto* (pp. 3-26). Alameda de Urquijo.

INURBE. (1996). Capítulo 8. Vivienda estatal y desarrollo urbano en Colombia. In INURBE (Ed.), *Estado, ciudad y vivienda: urbanismo y arquitectura de la vivienda estatal en Colombia, 1918-1990* (pp. 275-338). Bogotá.

Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. (2010). *Documento técnico de base para la elaboración de una política pública de construcción sostenible para el Valle de Aburrá*. Área Metropolitana del Valle de Aburrá - Subdirección Ambiental, Antioquia, Medellín.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Industrial de Santander. (S.F). *UIS - IDEAM*. Retrieved 24 de 11 de 2013 from 369102

Fabricación de ladrillos, baldosas, teja de arcilla:  
[http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/369102/369102\\_fr11.htm](http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/369102/369102_fr11.htm)

Instituto Colombiano de Normas Técnicas. (2009). NTC 4205-1 - Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 1: mampostería estructural.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas. (2009a). NTC 4205-2 - Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 2: mampostería no estructural.

Instituto Social de Vivienda y Hábitat de Medellín. (2014). *Instituto Social de Vivienda y Hábitat de Medellín*. Retrieved 10 de octubre de 2014 from ISVIMED: Instituto Social de Vivienda y Hábitat de Medellín. Tus sueños ya tienen donde vivir: <http://www.isvimed.gov.co>

Instituto Social de Vivienda y Hábitat de Medellín. (2014a). *Respuesta a radicado No. E2800 con fecha de 2014-04-09 [Derecho de Petición]*. Respuesta a derecho de petición, Instituto Social de Vivienda y Hábitat de Medellín, Medellín.

Hannula, E. (2012). *Going green a handbook of sustainable housing practices in developing countries*. . United Nations , Human Settlements Programme (UN-Habitat), Nairobi.

Hoof, B., & Nydia, S. (2005). *Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable*. Retrieved 25 de noviembre de 2014 from Conceptos básicos de análisis de ciclo de vida y su aplicación en el ecodiseño: [www.lcamexico.com](http://www.lcamexico.com)

Martinez de Anguita, P. (2004). Economía ambiental y ordenación del territorio. *Revista ecosistemas* , 13 (1), 87-93.

Matías Árbol Distribuciones. (S.F.). *Ladrillos cerámicos*. From [http://www.matiasarbol.com/catalogo/catalogo02\\_01.pdf](http://www.matiasarbol.com/catalogo/catalogo02_01.pdf)

Mesa Sectorial de Minería. (2003). *Estudio de caracterización de la industria de la arcilla*. Estudio, Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA, Regional Boyaca, Boyaca.

Mingarro Martín, F. (1996). *Curso de verano en el Escorial: degradación y conservación del patrimonio arquitectónico*. Madrid: Editorial Complutense S.A.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2011). *Serie guías de asistencia técnica para vivienda de interés social - 1. Calidad en vivienda de interés social*. Bogotá.

Moreno, J. (2010). *Beneficios económico-sociales al aplicar un proyecto de vivienda sustentable en el noreste del país*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

Parlamento Andino. (2013). *III Cumbre Social Andina*. Retrieved 03 de octubre de 2013 from Vivienda Social: <http://www.parlamentoandino.org/csa/documentos-de-trabajo/informes-ejecutivos/28-vivienda-social.html>

Pernett, G. (2011). Eco-materiales: la incidencia negativa de la construcción en el medio ambiente y su atenuación a partir del surgimiento de nuevos materiales de bajo impacto ambiental, a partir del reciclaje de plásticos industriales (PE, PP, PET) en Colombia. *Univesidad de América* , 4 (1), 59 - 78.

Por el cual se reglamentan el cumplimiento de los porcentajes de suelos destinados a programas de Vivienda de Interés Social para precios sujetos a los tratamiento urbanísticos de desarrollo y renovación y se dictan otras disposiciones, Decreto

0075 (El Ministerio 23 de enero de 2013).

Programa eficiencia energética en ladrilleras artesanales - EELA. (2011). *Caracterización de los hornos usados en la industria ladrillera: Proyecto Colombia*. Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, Bogotá.

Sustainable Buildings & Climate Change. (2009). *Building and Climate Change Summary for Decision-Makers*. Retrieved 15 de noviembre de 2013 from United Nations Environmental Programme: <http://www.unep.org/sbci/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>

Setri Sustentabilidad SAS. (2010). *Setri*. Retrieved 21 de noviembre de 2013 from Setri proceso de modelación energética: <http://www.setri.com.co/wp/2012/07/24/proceso-de-modelacion-energetica/>

Silva, J., & Sposto, R. (2010). A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program "MY HOUSE MY LIFE". *Elsevier Ltda* (57), 95-102.  
Sistemas de gestión ambiental - Requisitos con orientación para su uso, ISO 14001 (2004).

Solís San Vicente, S. (2005). Las necesidades sociales: el acercamiento a su construcción. In C. Arteaga Basurto, & S. Solís San Vicente (Eds.), *Necesidades sociales y desarrollo humano: un acercamiento metodológico* (pp. 27-70). Barcelona, España: Plaza y Valdés.

Rocha Tamayo, E. (2011). Construcciones sostenibles: materiales, certificaciones y LCA. *Revista nodo*, 6 (11), 99-116.

Universidad de Oviedo. (S.F.). *Lección 8. - Tipología de productos cerámicos*. Retrieved 2014 йил 05-noviembre from Universidad de Oviedo:

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion8.TipologiaProductos.ARCILLA.pdf>

Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 1: mampostería estructural, NTC 4205-1 (18 de 11 de 2009).

Vélez González, E. (2012). *Las acciones colectivas y organizaciones populares en la producción social de la vivienda en Medellín a partir de la década de los 90s*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Escuela de Planeación Urbano-Regional, Facultad de Arquitectura, Medellín.

Villarino Otero, A. (S.F). 4. Materiales cerámicos. En A. Villarino Otero, *Asignatura: Ciencias y tecnología de los materiales* (págs. 43-56). Ávila, España.