

**Evaluación del impacto ambiental asociado a la fabricación, uso y ciclo de vida del
ladrillo de temosa y bloque suelo-cemento**

Adriana del Pilar León Zambrano y Mónica Natali Velásquez Fonce

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Civil

Director

Camilo Andrés Carreño Niño

Magíster en Gestión de Proyectos

Magíster en Educación

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de ingenierías y arquitectura

Facultad de ingeniería civil

2026

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a Dios, por guiarnos y darnos la fortaleza necesaria para culminar esta importante etapa de nuestras vidas.

A nuestras familias, por su amor, apoyo incondicional, comprensión y sacrificio a lo largo de nuestra formación profesional. Gracias por creer en nosotras y acompañarnos en cada desafío y logro alcanzado.

A nuestros docentes, por compartir sus conocimientos, orientarnos durante este proceso académico y contribuir a nuestro crecimiento personal y profesional.

Finalmente, dedicamos este logro a todas las personas que, de una u otra manera, nos brindaron su apoyo y motivación para alcanzar esta meta.

Contenido

Introducción	11
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Justificación	15
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo general	16
1.3.2 Objetivos específicos.....	17
2. Estado del arte	17
3. Metodología.....	19
4. Desarrollo	21
4.1 Definición del sistema de estudio	21
4.2 Descripción de los materiales	22
4.2.1 Ladrillo cerámico macizo tipo Temosa.....	22
4.2.2 Bloque suelo-cemento.....	23
5. Inventario del Ciclo de Vida (ICV)	24
5.1 Determinación del peso del muro	25
5.2 Cálculos ICV.....	26
5.2.1 Inventario de ciclo de vida para ladrillo cerámico temosa	26
5.2.2 Inventario de ciclo de vida para ladrillo macizo bloque suelo-cemento.....	28
6. Evaluación de impactos (Matriz CONESA).....	31
7. Resultados.....	33
7.1 Resultados del inventario de ciclo de vida.....	33

7.2	Análisis por etapa de ciclo de vida	34
7.3	Metodología de la matriz CONESA	35
7.3.1	Evaluación mediante matriz.....	35
7.3.2	Análisis comparativo	36
7.3.3	Análisis diferencial de impactos	36
8.	Discusión	38
9.	Conclusiones y recomendaciones	39
9.1	Conclusiones	39
9.2	Recomendaciones	40
10.	Referencias.....	41
11.	Apéndices.....	41
	Apéndices.....	46

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Actividades metodológicas del objetivo específico 1</i>	19
Tabla 2. <i>Actividades metodológicas del objetivo específico 2</i>	20
Tabla 3. <i>Actividades metodológicas del objetivo específico 3</i>	20
Tabla 4. <i>Inventario del ciclo de vida del ladrillo cerámico tipo Temosa</i>	26
Tabla 5. <i>Inventario del ciclo de vida del bloque suelo-cemento</i>	29
Tabla 6. <i>Evaluación de impactos ambientales (Matriz CONESA)</i>	31
Tabla 7. <i>Resumen inventario ciclo de vida</i>	34
Tabla 8. <i>Resultados de la matriz CONESA</i>	36
Tabla 9. <i>Comparación de impactos dominantes</i>	37

Lista de figuras

Figura 1. *Proceso y flujos de entrada y salida del ladrillo cerámico tipo Temosa* 22

Figura 2. *Proceso y flujos de entrada y salida del bloque suelo-cemento.....* 24

Lista de apéndices

Apéndice A. <i>Cálculo del peso de los muros</i>	46
Apéndice B. <i>Cálculo del inventario de ciclo de vida.....</i>	53
Apéndice C. <i>Matriz CONESA.....</i>	85

Resumen

Problema: el sector de la construcción es uno de los principales generadores de impactos ambientales debido al alto consumo de recursos naturales, el uso intensivo de energía y a las emisiones asociadas a la producción de materiales. **Objetivo:** evaluar el impacto ambiental del ladrillo cerámico tipo Temosa y del bloque suelo-cemento mediante un enfoque de análisis de ciclo de vida (ACV), considerando las etapas de fabricación, uso y fin de vida. **Método:** como unidad funcional se definió 1 m² de muro, lo que permitió comparar ambos materiales bajo condiciones equivalentes. Se elaboró el inventario de ciclo de vida (ICV) y los impactos ambientales se evaluaron mediante la matriz CONESA. **Resultados:** la etapa de fabricación representa la mayor contribución a los impactos ambientales en ambos materiales. El ladrillo cerámico tipo Temosa, presenta impactos asociados al consumo energético y a las emisiones durante la cocción, mientras que el bloque suelo-cemento se ve afectado principalmente por el uso del cemento. La matriz CONESA, determinó que el bloque suelo-cemento presenta un mayor impacto ambiental; sin embargo. **Discusión:** este resultado depende de los criterios de evaluación empleados, lo que evidencia la necesidad de complementar este tipo de análisis con metodologías cuantitativas. En conclusión, la selección de materiales en la construcción debe considerar criterios ambientales, además de los técnicos y económicos, para contribuir al desarrollo de edificaciones más sostenibles.

Palabras clave: análisis de Ciclo de Vida, construcción sostenible, impacto ambiental, ladrillo cerámico, materiales de construcción, matriz CONESA, suelo-cemento

Abstract

Problem: the construction sector is one of the main sources of environmental impacts due to its high consumption of natural resources, intensive energy use, and emissions associated with the production of materials. **Objective:** to assess the environmental impact of Temosa-type ceramic bricks and soil-cement blocks using a life cycle assessment (LCA) approach, considering the manufacturing, use, and end-of-life stages. **Method:** a 1 m² wall was defined as the functional unit, allowing for a comparison of both materials under equivalent conditions. A life cycle inventory (LCI) was developed, and environmental impacts were assessed using the CONESA matrix. **Results:** the manufacturing stage accounts for the largest contribution to environmental impacts for both materials. The Temosa-type ceramic brick exhibits impact associated with energy consumption and emissions during firing, while the soil-cement block is primarily affected by cement use. The CONESA matrix determined that the soil-cement block has a greater environmental impact; however. **Discussion:** this result depends on the evaluation criteria used, highlighting the need to complement this type of analysis with quantitative methodologies. In conclusion, the selection of construction materials must consider environmental criteria, in addition to technical and economic factors, to contribute to the development of more sustainable buildings.

Keywords: Life Cycle Assessment, sustainable construction, environmental impact, ceramic brick, building materials, CONESA matrix, soil-cement

Glosario

Análisis de ciclo de vida (ACV): metodología que permite evaluar los impactos ambientales de un producto a lo largo de todas sus etapas, desde la extracción de sus materias primas hasta su disposición final. En este estudio se utiliza para comparar materiales de mampostería.

Bloque suelo-cemento: material de construcción elaborado a partir de la mezcla de suelo, cemento y agua siendo compactado mecánicamente sin requerir procesos de cocción.

Calentamiento global: aumento progresivo de la temperatura media del planeta, asociado principalmente a la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Ciclo de vida: conjunto de etapas por las cuales atraviesa un producto desde su producción hasta su disposición final.

Emisiones de CO₂: liberación de dióxido de carbono a la atmósfera, generalmente producida por actividades industriales, procesos de combustión y consumo de energía.

Energía incorporada: hace referencia a la cantidad total de energía utilizada en la producción de un material, incluyendo la extracción, el proceso y su fabricación.

Impacto ambiental: alteración o cambio causado al medio ambiente por actividades tanto humanas como procesos productivos.

Inventario del ciclo de vida (ICV): es la fase del análisis de ciclo de vida en la cual se cuantifican las entradas y salidas de materia y energía de un sistema.

Mampostería: es un sistema constructivo basado en la unión de unidades de ladrillos o bloques mediante el mortero.

Unidad funcional: medida de referencia la cual permite comparar sistemas dentro de un análisis de ciclo de vida, en este caso 1m² de muro.

Introducción

La creciente preocupación por el cambio climático y la sostenibilidad ambiental también ha impactado en el sector de la construcción ya que se posiciona como uno de los principales generadores de impactos ambientales, debido al alto consumo de recursos naturales, energía y la emisión de contaminantes a lo largo del ciclo de vida de los materiales utilizados [1], [2]. Por ello, la selección adecuada de materiales de construcción se convierte en un factor clave para la reducción de dichos impactos y la promoción de edificaciones sostenibles [3], [4].

Entre los materiales más utilizados en la construcción de muros en Colombia se encuentran el ladrillo cerámico tipo Temosa y el bloque suelo-cemento, los cuales presentan diferencias significativas en sus procesos de fabricación, desempeño técnico y comportamiento ambiental. Mientras el ladrillo cerámico requiere procesos de cocción a altas temperaturas que implican un elevado consumo energético, el bloque suelo-cemento se caracteriza por un proceso productivo menos intensivo en energía, lo que sugiere un menor impacto ambiental potencial [5], [6].

Estas diferencias evidencian la necesidad de aplicar herramientas metodológicas que permitan evaluar de manera integral el desempeño ambiental de los materiales de construcción a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida conforme a los lineamientos establecidos en las normas ISO 14040 e ISO 14044 [7], [8]. Este se constituye como una herramienta metodológica fundamental para la evaluación sistemática de los impactos ambientales asociados a un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final [9], [10]. Este enfoque permite identificar las etapas críticas del ciclo de vida y cuantificar los impactos en categorías ambientales relevantes, facilitando la toma de decisiones informadas en el ámbito de la construcción sostenible.

Diversos estudios han aplicado el análisis de ciclo de vida (ACV) en materiales de construcción para evaluar su impacto ambiental. Cabeza et al. [2] identificaron que la etapa de

fabricación concentra gran parte de la carga ambiental en edificaciones, mientras que Pomponi y Moncaster [11] resaltan la importancia del carbono incorporado en los materiales. Asimismo, Koroneos y Dompros [5] mostraron el elevado consumo energético asociado a la fabricación de materiales cerámicos, justificando la necesidad de desarrollar estudios comparativos al contexto colombiano.

La presente investigación tiene como objetivo evaluar, mediante un enfoque cuantitativo y comparativo basado en el análisis de ciclo de vida (ACV) con la matriz de impactos CONESA, metodología desarrollada por Conesa Fernández-Vítora para la identificación y valoración cualitativa de impactos ambientales; en este caso, del ladrillo cerámico tipo Temosa y el bloque suelo-cemento a lo largo de sus etapas de fabricación, uso y fin de vida. Para ello, se establece una unidad funcional común que garantiza la comparabilidad técnica entre ambos materiales, permitiendo analizar su desempeño ambiental bajo condiciones equivalentes [7].

Además, el estudio busca no solo cuantificar y comparar los impactos ambientales de estos materiales, sino también formular criterios técnicos de selección que contribuyan al diseño y ejecución de edificaciones sostenibles [3]. De esta manera, la investigación aporta herramientas técnicas y conceptuales que facilitan la toma de decisiones en el sector de la construcción, orientadas hacia la reducción de impactos ambientales y el uso eficiente de los recursos.

1. Evaluación del impacto ambiental asociado a la fabricación, uso y ciclo de vida del ladrillo de temosa y bloque suelo-cemento

1.1 Planteamiento del problema

El sector de la construcción en Colombia representa uno de los principales motores de desarrollo económico y urbano. Sin embargo, también es uno de los mayores generadores de residuos, debido al uso intensivo de recursos naturales y a los impactos ambientales asociados al consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero [1], [12]. A nivel global, las edificaciones y la construcción representan el 38% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas con la energía [1]. En el contexto nacional, esta situación se refleja en el crecimiento constante del sector y en la producción de materiales como cemento, agregados pétreos y productos cerámicos, cuyos procesos de transformación requieren una alta demanda energética [13].

En Colombia, los residuos de construcción y demolición representan una proporción significativa de los residuos sólidos urbanos generados, lo que ha impulsado la formulación de estrategias para su gestión y aprovechamiento bajo un enfoque de economía circular [14]. Bajo este enfoque, el país ha implementado instrumentos como la Política Nacional de Edificaciones Sostenibles, orientada a la reducción de impactos ambientales mediante el uso eficiente de materiales, agua y energía [15]. A pesar de ello, la selección de materiales en los proyectos de construcción continúa realizándose principalmente con base en criterios técnicos, estructurales y económicos, sin integrar de manera sistemática el desempeño ambiental a lo largo de su ciclo de vida [3].

Los sistemas constructivos en mampostería son ampliamente utilizados en el país en distintos tipos de edificaciones, siendo el ladrillo cerámico estructural uno de los materiales más

tradicionales. No obstante, su proceso de fabricación incluye etapas de cocción a altas temperaturas, lo que genera un elevado consumo energético y emisiones atmosféricas significativas [5]. De igual manera, los materiales fabricados con cemento presentan impactos ambientales asociados a la producción de clínker, considerada una de las principales fuentes de emisiones de CO₂ en la industria de la construcción [6].

Frente a esta problemática, han surgido alternativas como la temosa y los bloques de suelo-cemento, que buscan mejorar el desempeño térmico y reducir la energía incorporada y el uso de materiales. Sin embargo, en el contexto colombiano existe una limitada disponibilidad de estudios comparativos que evalúen su comportamiento ambiental bajo un mismo enfoque metodológico [16], [11].

El análisis de ciclo de vida (ACV), estandarizado por las normas ISO 14040 e ISO 14044, permite cuantificar los impactos ambientales de un producto desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, constituyéndose en una herramienta fundamental para la toma de decisiones en la construcción sostenible [7], [8], [2]. No obstante, su aplicación en la evaluación de materiales de mampostería en Colombia es aún incipiente, lo que dificulta la definición de criterios técnicos que orienten la selección de alternativas con menor impacto ambiental en edificaciones [17].

Es por esto, que, surge la necesidad de evaluar el desempeño ambiental de los materiales de mampostería utilizados en el país, considerando todas las etapas de su ciclo de vida, con el fin de generar información técnica que contribuya a la reducción de los impactos ambientales asociados al sector de la construcción y promueva una mayor sostenibilidad.

En consecuencia, la pregunta de investigación se formula de la siguiente manera:

¿Cuál es el desempeño ambiental, desde un enfoque de análisis de ciclo de vida “de la cuna a la tumba”, del ladrillo cerámico tipo Temosa en comparación con el bloque suelo-cemento en Colombia, y cómo pueden estos resultados orientar la definición de criterios técnicos para la selección de materiales en edificaciones sostenibles?

1.2 Justificación

El sector de la construcción es reconocido a nivel mundial como uno de los principales consumidores de materias primas y energía, así como también uno de los mayores generadores de emisiones de gases de efecto invernadero. Según el United Nations Environment Programme [1], los edificios y la construcción representan aproximadamente el 37% de las emisiones globales del CO₂ relacionadas con la energía y más del 30% del consumo mundial de recursos. Por esta razón, ha surgido la necesidad de incorporar criterios de sostenibilidad en el diseño, selección y uso de los materiales de construcción, especialmente en países en desarrollo donde el crecimiento del sector de la construcción es acelerado [3], [4]. En Colombia, este sector es un eje fundamental para el desarrollo económico y social, con una participación significativa en el producto interno bruto y en la generación de empleo, de acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística [12], lo cual incrementa la demanda de materiales y, en consecuencia, los impactos ambientales asociados a su producción.

Los materiales como el ladrillo tipo Temosa y el bloque suelo-cemento son ampliamente utilizados en la construcción de edificaciones debido a sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad. Sin embargo, su proceso de fabricación implica un consumo de energía, extracción de recursos naturales y generación de emisiones atmosféricas, aspectos que deben ser evaluados desde un enfoque integral [5], [6]. Tradicionalmente, la selección de los materiales en la ingeniería

civil se ha basado en criterios económicos, estructurales y constructivos, centrados en sus propiedades mecánicas y su comportamiento en servicio [18], [19]. No obstante, autores como Kibert [3] y Ashby [20] señalan que la ingeniería contemporánea requiere incorporar el desempeño ambiental como un criterio fundamental para la toma de decisiones, con el fin de reducir los impactos ambientales asociados al ciclo de vida de las edificaciones.

Desde el punto de vista técnico, esta investigación proporciona información relevante para la selección de materiales con un menor impacto ambiental, lo cual es coherente con las políticas de construcción sostenibles promovidas por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio [21] a través de la Guía de Construcción Sostenible para el Ahorro de Agua y Energía en Edificaciones. Asimismo, los resultados pueden apoyar a la toma de decisiones en el diseño y la ejecución de los proyectos, optimizando el uso de los recursos y así reduciendo el consumo energético y las emisiones contaminantes asociadas a los materiales de la mampostería.

En términos académicos y metodológicos, este estudio fortalece el conocimiento sobre el desempeño ambiental de materiales de construcción con un uso frecuente en el país, aportando información que puede ser como base para futuras investigaciones y para el desarrollo de estrategias orientadas a la sostenibilidad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar mediante análisis de ciclo de vida el impacto ambiental del ladrillo cerámico tipo Temosa y el bloque suelo-cemento a lo largo de las etapas de fabricación, uso y fin de vida.

1.3.2 Objetivos específicos

Cuantificar los impactos ambientales generados en las etapas de fabricación, uso y fin de vida del ladrillo cerámico tipo Temosa y el bloque suelo-cemento mediante la metodología de análisis de ciclo de vida.

Comparar el desempeño ambiental de ambos materiales para edificaciones sostenibles con base en los resultados obtenidos.

Formular criterios técnicos de selección para edificaciones sostenibles a partir de la interpretación de resultados.

2. Estado del arte

El presente estado del arte reúne investigaciones relacionadas a la aplicación del análisis de ciclo de vida (ACV) y a otras herramientas de evaluación ambiental en materiales de construcción, principalmente en ladrillos cerámicos y bloques suelo – cemento. Esta revisión bibliográfica permite identificar avances metodológicos, tendencias de investigación y vacíos existentes en contextos nacionales e internacionales, los cuales sustentan el desarrollo de la presente investigación.

En el caso de los materiales cerámicos, diferentes estudios han demostrado que el proceso de cocción representa el principal foco de impacto ambiental debido al uso de combustibles y las emisiones de CO₂ [5], [6], [2]. Investigaciones como las de Kua [4] y Pomponi y Moncaster [11] indican que la energía incorporada en los ladrillos cerámicos es considerablemente alta en comparación a otros materiales de mampostería. Estudios más recientes han analizado la optimización de los procesos de fabricación de unidades cerámicas mediante mejoras en la eficiencia energética y el uso de combustibles alternativos, logrando así la reducción en la huella de carbono [22], [23].

En contraste, los bloques suelo-cemento han sido estudiados como una alternativa de menor impacto ambiental, ya que su proceso de fabricación no requiere de cocción y permite un mejor aprovechamiento de los materiales disponibles localmente. Investigaciones desarrolladas por Ben-Alon et al. [23] y Silva et al. [24] evidencian que este tipo de materiales presentan reducciones significativas en el potencial de calentamiento global y en el consumo energético frente a materiales cerámicos, siempre y cuando se controle el contenido de cemento y las distancias de transporte. Esto permite entender que los ladrillos de bloque suelo-cemento también contribuyen a la disminución del uso de los recursos naturales y a la generación de sistemas constructivos más sostenibles.

En América Latina, la aplicación del ACV en materiales de mampostería ha permitido evidenciar la importancia del contexto regional en los resultados obtenidos, debido a diferencias en las matrices energéticas, los procesos productivos y las distancias de transporte. Estudios realizados en Brasil [24], México [25] y Chile [26] donde se han comparado bloques cerámicos, bloques de concreto y unidades de suelo estabilizado, demuestran la necesidad de contar con inventarios de ciclo de vida con información local para mejorar la precisión de los análisis [25].

Además del ACV, la matriz CONESA ha sido empleada como una herramienta cualitativa para la evaluación de impactos ambientales, permitiendo jerarquizar los efectos ambientales mediante criterios como intensidad, persistencia, reversibilidad y recuperabilidad [27]. Su aplicación complementa los análisis cuantitativos y facilita la interpretación integral de los impactos ambientales en proyectos constructivos.

En Colombia, aunque se han desarrollado investigaciones relacionadas a la energía incorporada y la huella de carbono en edificaciones, los estudios comparativos de ACV enfocados en materiales de mampostería siguen siendo limitados. Trabajos como el de Ortiz-Rodríguez et al.

[16] han demostrado que los materiales de construcción representan una gran parte en los impactos ambientales en el ciclo de vida de las edificaciones, lo cual evidencia la necesidad de generar información aplicada al contexto nacional.

A partir de lo anterior, se identifica un vacío en investigaciones comparativas aplicadas al contexto colombiano que evalúen mediante ACV y matriz CONESA, el desempeño del ladrillo cerámico tipo Temosa y del bloque suelo – cemento bajo una misma unidad funcional. Por lo tanto, la presente investigación se enmarca en la necesidad de generar información técnica y ambiental que permita establecer criterios para la selección de materiales de mampostería con menor impacto ambiental y contribuir al desarrollo de edificaciones sostenibles.

3. Metodología

La investigación se desarrolló bajo el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), conforme a los lineamientos establecidos en las normas ISO 14040 e ISO 14044, las cuales definen el marco general, los principios y los requisitos para la evaluación del desempeño ambiental de productos [7], [8].

El estudio tuvo un enfoque cuantitativo y comparativo, evaluando el desempeño ambiental del ladrillo cerámico tipo Temosa y el bloque suelo-cemento, considerando las etapas de fabricación, uso y fin de vida. Se estableció una unidad funcional común (1 m² de muro con iguales condiciones estructurales), para garantizar la comparabilidad técnica y ambiental entre los materiales analizados [7], [9].

Las actividades metodológicas se organizan de la siguiente manera:

Tabla 1. *Actividades metodológicas del objetivo específico 1*

Objetivo	Actividad	Descripción
----------	-----------	-------------

Cuantificar los impactos ambientales generados en las etapas de fabricación, uso y fin de vida	Definición del alcance técnico	Determinación de la unidad funcional, límites del sistema, categorías de impacto y supuestos de modelación
	Elaboración del Inventario del Ciclo de Vida (ICV)	Recopilación de datos sobre consumo de energía, materias primas, emisiones y residuos
	Matriz de impactos ambientales CONESA	Organización de datos para cálculo de indicadores ambientales
	Análisis por etapas del ciclo de vida	Identificación de etapas con mayor impacto ambiental

Nota: La tabla fue elaborada con base en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida establecida en las normas ISO 14040 e ISO 14044 [7], [8].

Tabla 2. Actividades metodológicas del objetivo específico 2

Objetivo	Actividad	Descripción
Comparar el desempeño ambiental de los materiales	Normalización de resultados	Organización en tablas y gráficos comparativos
	Análisis estadístico	Cálculos de promedios y porcentajes
	Evaluación comparativa	Comparación por categorías de impacto
	Análisis de sensibilidad	Evaluación de cambios en parámetros

Nota: La tabla fue elaborada con base en el procedimiento de evaluación ambiental definido para el análisis comparativo de los materiales de construcción estudiados [7], [8], [27].

Tabla 3. Actividades metodológicas del objetivo específico 3

Objetivo	Actividad	Descripción
Formular criterios técnicos de selección	Interpretación técnica	Análisis conjunto ambiental y constructivo
	Umbrales de desempeño	Definición de rangos de impacto
	Lineamientos técnicos	Criterios de selección de materiales
	Validación conceptual	Comparación con literatura

Nota: La tabla fue elaborada con base en la metodología de evaluación de impactos ambientales mediante la matriz CONESA [27].

4. Desarrollo

4.1 Definición del sistema de estudio

El presente estudio se desarrolla bajo el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con el objetivo de evaluar el desempeño ambiental del ladrillo cerámico tipo Temosa y el bloque suelo-cemento. Este enfoque permite analizar de manera integral los impactos ambientales asociados a cada material a lo largo de todo su ciclo de vida.

Se establece como unidad funcional 1m² de muro construido, considerando condiciones estructurales equivalentes entre ambos materiales, con el fin de garantizar la comparabilidad técnica y ambiental de los resultados obtenidos.

Los límites se definen bajo un enfoque “de la cuna a la tumba”, incluyendo etapas como la extracción de materias primas, fabricación, uso y disposición final de los materiales. Para el presente estudio no se considera la etapa de transporte, debido a la variabilidad en las distancias y condiciones logísticas, lo que podría generar incertidumbre en los resultados, por esta razón, el análisis se centra en las etapas que permiten una comparación homogénea entre los materiales evaluados.

Las principales categorías de impacto consideradas corresponden al calentamiento global (emisiones de CO₂), el consumo energético y la generación de residuos, de acuerdo con estudios de análisis ambiental de materiales de construcción.

Finalmente, el estudio se desarrolla con base en información secundaria proveniente de literatura científica, bases de datos especializadas y fichas técnicas de los materiales, garantizando la consistencia y trazabilidad de los datos empleados en el análisis.

4.2 Descripción de los materiales

4.2.1 Ladrillo cerámico macizo tipo Temosa

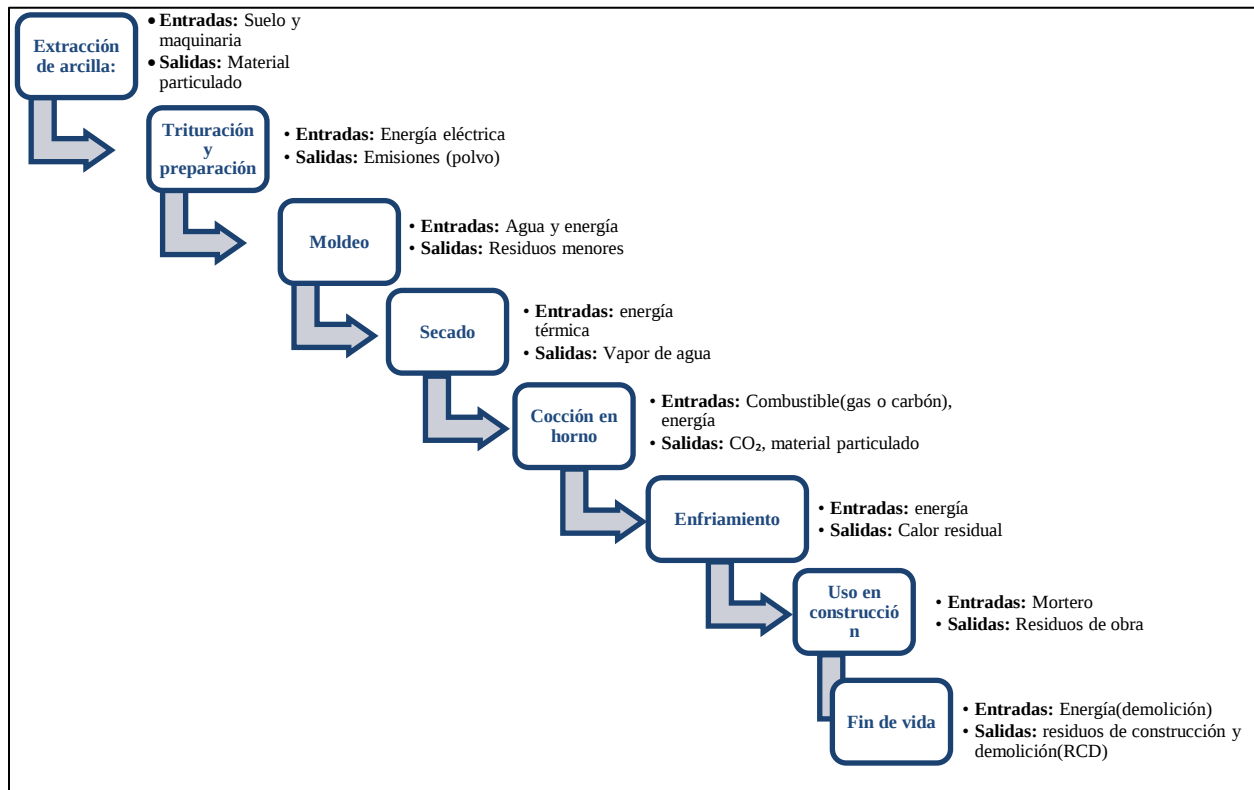
El ladrillo cerámico tipo Temosa analizado en este estudio corresponde a unidades macizas utilizadas en sistemas de mampostería estructural. Este material es ampliamente usado en el sector de la construcción en Colombia por su resistencia mecánica, comportamiento estructural y durabilidad [5], [6].

Su proceso de fabricación va desde la extracción de arcilla, trituración y la preparación de materia prima, moldeo, secado y su cocción en hornos a altas temperaturas. En esta última etapa es donde se ve implicado un alto consumo energético y emisiones atmosféricas, principalmente el dióxido de carbono (CO_2), el cual representa una de las principales cargas ambientales asociadas a este tipo de material [5], [6].

Además, al tratarse de unidades macizas, presenta un mayor consumo de materia prima por unidad en comparación a otros sistemas constructivos, lo cual puede influir en su desempeño ambiental a lo largo de todo su ciclo de vida [2], [20].

En la Figura 1 se presenta el proceso productivo del ladrillo cerámico tipo Temosa, incluyendo las etapas de extracción, preparación, moldeo, secado y cocción.

Figura 1. *Proceso y flujos de entrada y salida del ladrillo cerámico tipo Temosa*



Nota: La figura fue elaborada con base en la información recopilada de las fuentes citadas [22], [28], [29], [30] y [31].

4.2.2 Bloque suelo-cemento

El bloque suelo-cemento es un material alternativo utilizado en la construcción de muros, el cual se obtiene a partir de la mezcla de suelo, cemento y agua, seguido de un proceso de compactación mecánica.

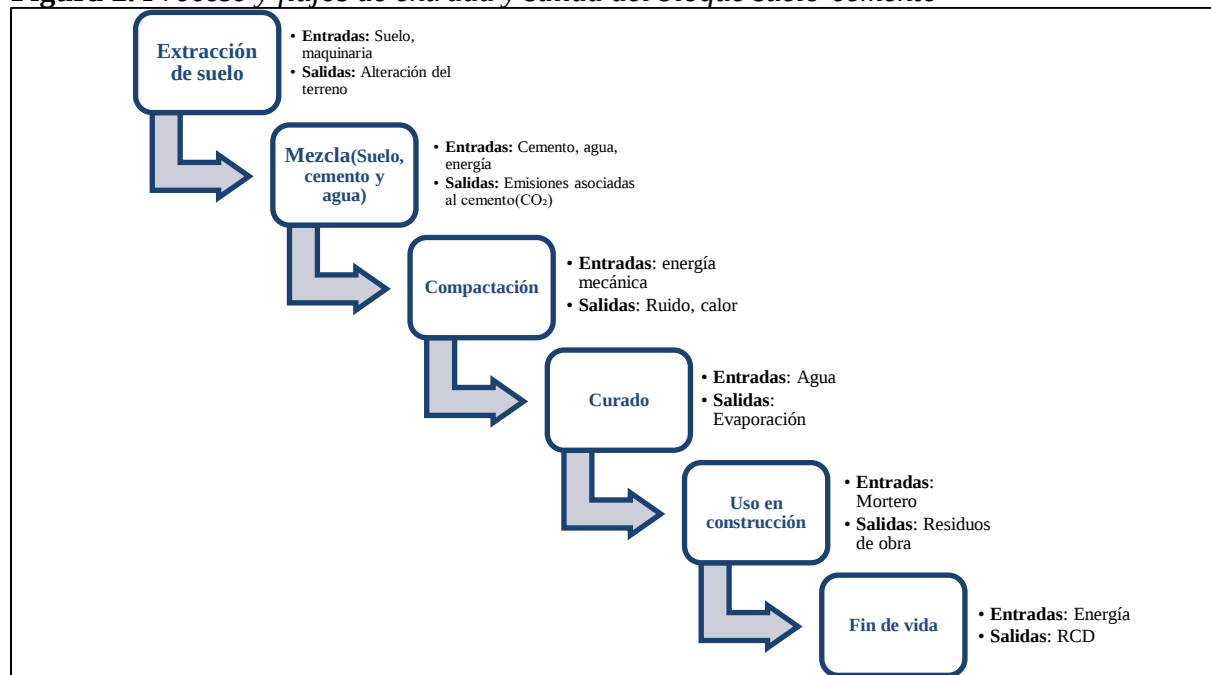
A diferencia del ladrillo cerámico, el bloque suelo-cemento no requiere de procesos de cocción, lo que reduce significativamente el consumo energético durante su proceso de fabricación [23], [24]. Posteriormente, los bloques son sometidos a un proceso de curado que permite el desarrollo de sus propiedades mecánicas.

En términos ambientales, el bloque suelo-cemento presenta ventajas relacionadas con la reducción de emisiones y al aprovechamiento de materiales disponibles localmente. Sin embargo,

su desempeño depende de factores como la calidad del suelo, la proporción de cemento empleada y las condiciones del curado [23].

En la Figura 2 se presenta el proceso productivo del ladrillo bloque suelo-cemento, incluyendo las etapas de extracción, preparación, compactación y curado.

Figura 2. Proceso y flujos de entrada y salida del bloque suelo-cemento



Nota: La figura fue elaborada con base en la información recopilada de las fuentes citadas [6], [28], [29], [30], [31], [32] y [33].

5. Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

El inventario de Ciclo de Vida (ICV) corresponde a la fase del análisis en la cual se recopila y cuantifica los flujos de entrada y salida relacionados a cada una de las etapas de los materiales de estudio. En esta etapa se consideran variables como el consumo de materias primas, energía, emisiones atmosféricas y la generación de residuos, para establecer una base cuantitativa para la evaluación de los impactos ambientales.

Como resultado del levantamiento de información para el inventario del ciclo de vida, se identificó que los principales aportes ambientales del sistema constructivo están asociados al uso de ladrillo macizo, al consumo de agua y energía durante las etapas de producción y a la utilización de mortero en la conformación del muro. Asimismo, se evidenció la presencia de pérdidas de material derivadas de las actividades constructivas, las cuales fueron consideradas dentro del análisis para representar de manera más precisa las condiciones reales de ejecución de obra.

La consolidación de la información permitió establecer una base de datos representativa del proceso constructivo, integrando parámetros técnicos y ambientales obtenidos de literatura científica, bases de datos especializadas y documentos técnicos relacionados con materiales de construcción.

5.1 Determinación del peso del muro

De acuerdo con la unidad funcional definida (1m² de muro), se estimó el peso de los sistemas constructivos analizados, para garantizar la coherencia entre los flujos del inventario del ciclo de vida y la base de comparación.

Para el ladrillo cerámico tipo Temosa, el peso del muro se determinó a partir de sus dimensiones, densidad y el número de unidades por metro cuadrado, obteniendo un valor base al que se incorporaron factores como el consumo de mortero y su variabilidad en obra. Como resultado, se obtuvo un peso representativo de 225Kg (ver Anexo A).

Para el bloque suelo-cemento, el peso se calculó considerando sus características geométricas, densidad y consumo de mortero, lo que dio como resultado un valor aproximado de 90 kg, (ver Anexo A).

5.2 Cálculos ICV

5.2.1 Inventario de ciclo de vida para ladrillo cerámico temosa

Se construyó el ICV del ladrillo cerámico temosa, considerando las principales etapas del proceso productivo: recolección de materias primas, fabricación, uso y fin de vida. Este inventario permite identificar y organizar los flujos de entrada (materias primas, energía, agua) y salida (emisiones, residuos e impactos) asociados al sistema evaluado (ver Tabla 4).

Para la etapa de cocción, se consideró el uso de un horno túnel con combustión de gas natural, tecnología ampliamente empleada en la industria cerámica por sus ventajas en eficiencia y control ambiental [5], [22]. Este tipo de horno permite una operación continua, mejor distribución térmica y mayor uniformidad en la calidad del producto. Además, el uso de gas natural como combustible presenta beneficios frente a otras alternativas como el carbón, debido a sus menores emisiones de material particulado, dióxido de azufre (SO₂) y compuestos contaminantes, contribuyendo así a una reducción del impacto sobre la calidad del aire y el cambio climático [30].

La etapa de uso no registra entradas de materia o energía porque el ladrillo es un componente pasivo. Sin embargo, se considera su inercia térmica como un impacto positivo (Ahorro Energético) y su neutralidad química como un beneficio para la salud humana, factores que se valoran cualitativamente en la Matriz de CONESA.

Tabla 4. *Inventario del ciclo de vida del ladrillo cerámico tipo Temosa*

Procesos	Actividad	Entradas	Cantidad	Salidas (Impactos)	Cantidad	Factor Ambiental	Referencias
Recolección	Extracción Arcilla	Arcilla virgen	178Kg	Perdida de suelo	0.011m3	Recurso natural	[28], [30], [29]

Fabricación	Suministro Energético	Gas Natural (Gasoducto)	12.5m3	Material particulado	2.14gr	[28], [30], [29].			
				Ruido maquinaria	85-90dB	[29]			
				CH4	0.57gr	[30]			
	Preparación y Mezcla	Agua de moldeo	35.6 Litros	Ruido molienda	85-90dB	Agua	[29]		
		Energía eléctrica	4.05kWh			Aire	[28]		
	Secado	Aire caliente residual	89MJ/Kg	Vapor de agua	35.6Kg	Recursos naturales	[30]		
				PM10	0.17Kg	[30]			
				CO2	24.5Kg	[30]			
				Cocción (Horno Túnel)	Gas Natural	12.5m3	Trazas de Nox	0.02Kg	[30]
					Energía térmica	450MJ	Calor emitido	37.5MJ	[30]
Construcción	Preparación de mezcla	Mortero	63Kg	Agua	9.6 Litros	Agua	[35]		
	Levantamiento de muro			Desperdicio mortero	4.41Kg	Aire			
				Ladrillo	162Kg	PM10		120gr	Suelo
Procesos	Actividad	Entradas	Cantidad	Salidas (Impactos)	Cantidad	Factor Ambiental	Referencias		
Fin de vida	Demolición	Energía mecánica	0.5kWh	Desperdicio ladrillo	4.86Kg	Suelo	[31]		
				RCD	225Kg				

PM10	190gr	Aire	[29]
------	-------	------	------

Nota: La tabla fue adaptada a partir de las distintas fuentes de información citadas [22], [28], [29], [30], [31] y [35].

Los cálculos detallados que sustentan la información presentada en la Tabla 4. se consignan en el Anexo B. En dicho apartado se describen de manera rigurosa los procedimientos metodológicos, los supuestos adoptados y los criterios técnicos empleados para la estimación de los flujos de entrada y salida del sistema analizado. Asimismo, se incluyen los balances de materia y energía, junto con los factores de conversión utilizados, lo que garantiza la trazabilidad, reproducibilidad y coherencia de los resultados obtenidos en el presente estudio.

5.2.2 Inventario de ciclo de vida para ladrillo macizo bloque suelo-cemento

Se presenta el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) detallado para un metro cuadrado de muro construido con bloques de suelo-cemento. Este inventario constituye la base cuantitativa necesaria para alimentar la Matriz de Conesa, permitiendo identificar de manera objetiva las entradas (recursos y energía) y las salidas (emisiones y residuos) en cada una de las etapas del proceso.

Para el cálculo de los valores aquí expuestos, se ha tomado como Unidad Funcional 1m^2 de muro macizo conformado por 28 bloques con un peso total de 239.43Kg y 50.4Kg de mortero de pega (ver Anexo A). Los datos integran factores de emisión estandarizados para Colombia y requerimientos técnicos de procesos de fabricación tecnificados, abarcando desde la obtención de materias primas hasta el fin de vida de la estructura establecido en la Resolución 620 del 2008 emitida por el IGAC [31], la cual ha definido: Artículo 2° - Parágrafo. Para inmuebles cuyo sistema constructivo sea muros de carga, la vida útil será de 70 años.

Los factores de emisión de material particulado se obtuvieron de la recopilación de factores del AP-42 de la United States Environmental Protection Agency [32] (Sección 13.2.4), ajustados a las condiciones de humedad y velocidad del viento de la zona de estudio, siguiendo los lineamientos de la Guía Ambiental para el Sector Ladrillero de Colombia [33].

Tabla 5. *Inventario del ciclo de vida del bloque suelo-cemento*

Evaluación Ambiental del Ciclo de Vida del Cemento								
Procesos	Actividad	Entradas	Cantidad	Salidas (Impactos)	Cantidad	Factor Ambiental	Referencias	
Recolección	Extracción de materiales	Suelo	264 kg	Perdida de suelo	26.4 Kg	Recurso natural	[36], [37]	
				PM10	0.003 kg		[36], [37]	
	Fabricación cemento Portland	Caliza	32.24 Kg	Ruido	95 dB	Recurso natural	[28], [30]	
		Arcilla	8.06 Kg	PM10	13kg		[28], [30]	
		Electricidad	2.6 kWh				[28], [30]	
		Calor	104MJ	CO2 proceso químico	20.8 Kg	Aire	[28], [30]	
		Gas	3.0 m3	CO2	5.88 Kg	Recurso natural	[28], [30]	
				Nox	4.8 Kg		[28], [30]	
				SO2	4.8 Kg		[28], [30]	
		Yeso	1.82 Kg	Ruido	90 dB	Aire	[28], [30]	
				Calor residual	10.4MJ			
	Suministro Energético	Gas Natural (Gasoducto)	3.0 m3	CH4	0.13gr		[30]	
Fabricación	Preparación (tamizado y triturado del suelo)	Energía eléctrica	0.8Kwh	Vibraciones mecánicas	60 Hz	Aire	[29], [28], [30])	
Procesos	Actividad	Entradas	Cantidad	Salidas (Impactos)	Cantidad	Factor Ambiental	Referencias	

				Ruido operacional	85 dB	[29]	
				Trazas Metano CH4	0.005g	[30]	
				Trazas CO2	0.1 Kg		
Construcción	Mezclado y prensado	Cemento Portland	25.85 Kg	PM10	0.0026 Kg	Aire	
		Energía eléctrica	0.51kWh	Ruido	90 dB		
	Curado	Agua	25.1 Litros	Humedad evaporada	18.83 Litros	Agua	
		Energía	0.3kWh	Trazas CO2	0.037 kg	Aire	
				Trazas CH4	0.0018 gr		
				plástico	1.5 m2		
Construcción	Preparación mezcla	Mortero	50.4Kg	Agua	7.7 Litros	Agua	[35]
				Desperdicio mortero	3.53 Kg	Aire	
	Corte y levantamiento de muros	Ladrillo	239.43Kg	PM10	120 gr	Suelo	
				Desperdicio ladrillo	7.2 Kg		
Uso	Uso	Muro	1m2	CO2 atmosférico	2.5 Kg	Aire	[30], [29])
				Sedimento polvo	1.5 gr	Suelo	[30], [29])
Fin de vida	Demolición	Energía mecánica	0.5kWh	RCD	290 kg	Suelo	[31], [29]
				PM10	249 gr	Aire	[31], [29])

Nota: La tabla fue adaptada a partir de las distintas fuentes de información citadas [6], [28], [29], [30], [31], [32] y [33].

Los datos obtenidos en el inventario anterior permiten realizar una valoración precisa de los impactos ambientales mediante la fórmula de importancia de Conesa. Se observa que, a diferencia de los procesos cerámicos tradicionales, la producción de suelo-cemento elimina la etapa de cocción, reduciendo drásticamente la huella de carbono directa [34]. No obstante, se identifica un impacto crítico en la etapa de recolección debido a la intensidad en la extracción de suelo y la huella indirecta de la fabricación del cemento Portland.

Los cálculos detallados que sustentan la información presentada en la Tabla 5. se consignan en el Anexo B. En dicho apartado se describen de manera rigurosa los procedimientos metodológicos, los supuestos adoptados y los criterios técnicos empleados para la estimación de los flujos de entrada y salida del sistema analizado, lo que garantiza la trazabilidad, reproducibilidad y coherencia de los resultados obtenidos en el presente estudio.

6. Evaluación de impactos (Matriz CONESA)

Una vez consolidado el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) y definidos los flujos de entrada y salida para ambos materiales, se procede a la valoración cualitativa y cuantitativa de los impactos identificados. Para este fin, se emplea el método de la Matriz de Importancia de Conesa [27], el cual permite ponderar la relevancia de cada alteración ambiental mediante la evaluación que permite transformar datos técnicos del ciclo de vida en rangos de importancia ambiental (compatibles, moderados, severos o críticos), estableciendo una base objetiva para comparar el desempeño ecológico del bloque suelo-cemento frente al ladrillo cerámico temosa.

Tabla 6. *Evaluación de impactos ambientales (Matriz CONESA)*

Evaluación de impactos ambientales			
	1	5	10
Probabilidad	Baja: La probabilidad es baja cuando la actividad se realiza bajo condiciones seguras, y el impacto se presenta sólo en casos inusuales.	Media: La probabilidad es media cuando al realizar la tarea se presentan circunstancias como: falta de capacitación, entrenamiento, experiencia o ausencia de procedimientos escritos específicos para la realización de la actividad, etc.	Alta: La probabilidad es alta cuando en condiciones normales y dadas las características de la actividad y/o proceso, el impacto se presenta con toda seguridad
Duración	Breve: La duración es breve cuando el impacto dura un lapso (No permanece en el tiempo) muy pequeño y no existe ningún potencial de riesgo sobre el ambiente.	Temporal: La duración es temporal cuando el impacto dura un lapso moderado y tiene un potencial de riesgo medio, produciendo cambios limitados sobre el ambiente.	Permanente: La duración es permanente cuando el impacto causa alteraciones indefinidas en el tiempo e importantes sobre el ambiente. Las partes interesadas manifiestan objeciones y exigencias.
Magnitud	Baja: La magnitud es baja cuando el impacto causa una alteración mínima al ambiente	Media: La magnitud es media cuando el impacto causa una alteración moderada sobre el ambiente.	Alta: La magnitud es alta cuando el impacto se asocia a destrucción del ambiente o sus características, trayendo consecuencias futuras importantes.
Área de influencia	Puntual: El área de influencia es puntual cuando el impacto se manifiesta únicamente en el área donde se realizan las actividades del proceso	Local: El área de influencia es local cuando el impacto se manifiesta en el ambiente local (afecta un curso superficial o subterráneo de agua, la atmósfera, el suelo, genera un residuo especial, etc.	Regional: El área de influencia es regional cuando el impacto tiene consecuencias a nivel regional.

Evaluación de impactos ambientales			
	1	5	10
Recuperabilidad	Mitigable: La recuperabilidad es mitigable cuando el impacto se puede eliminar mediante actividades que permitan recuperar los recursos afectados.	Recuperable: Es recuperable cuando el impacto se puede disminuir implementando medidas de control en las actividades (recuperación, reutilización en el proceso) hasta un estándar determinado.	Irrecuperable: Es irrecuperable cuando los recursos naturales afectados no se pueden retornar a las condiciones originales.
Importancia	Baja: La importancia es baja cuando es posible manejar el aspecto ambiental implementando controles operacionales en las actividades.	Media: La importancia es media cuando es posible adaptar medidas para cumplir y manejar el aspecto ambiental	Alta: La importancia es alta cuando para manejar el aspecto ambiental se requieren altas inversiones de capital

Nota: La tabla fue adaptada a partir de la metodología propuesta por Conesa Fernández-Vítora [27].

7. Resultados

7.1 Resultados del inventario de ciclo de vida

Con el desarrollo del inventario de ciclo de vida (ICV), se identificaron los principales flujos de entrada y salida asociados a los materiales analizados, considerando las etapas de fabricación, construcción y fin de vida.

En el caso del ladrillo cerámico tipo Temosa, se encontró un alto consumo energético en la etapa de fabricación, principalmente asociado al proceso de cocción en horno túnel [5], [22]. Este proceso requiere un uso intensivo de combustibles, lo que genera emisiones significativas de dióxido de carbono (CO₂) y otros contaminantes atmosféricos. Asimismo, se identificó la generación de residuos sólidos durante las etapas de construcción y demolición.

Por su parte, el bloque suelo cemento presenta un menor consumo energético directo, debido a la ausencia de procesos térmicos. Sin embargo, el análisis del inventario mostró un uso considerable de cemento como materia prima, lo cual representa una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero [6]. De igual manera, se identificaron impactos asociados al uso de recursos naturales y a la generación de residuos en las etapas constructivas.

En la tabla 7 se presenta un resumen de los principales flujos identificados en el inventario de ciclo de vida para los materiales evaluados.

Tabla 7. *Resumen del inventario ciclo de vida*

Material	Energía	CO₂	Recursos	Residuos
Temosa	Alto	Alto	Medio	Medio
Suelo-cemento	Medio	Alto	Alto	Medio

Nota: La tabla resume los principales flujos identificados durante el Inventario de Ciclo de Vida de los materiales evaluados en la presente investigación.

7.2 Análisis por etapa de ciclo de vida

El análisis por etapas permitió identificar los puntos críticos dentro del ciclo de vida de cada material.

En el ladrillo cerámico tipo Temosa, la etapa de fabricación concentra la mayor carga ambiental lo cual coincide con estudios previos en materiales de construcción [2], [11], debido principalmente al consumo energético y a las emisiones derivadas del proceso de cocción. Las etapas de construcción y fin de vida presentan impactos de menor magnitud, relacionadas principalmente con la generación de residuos y emisiones de material particulado.

En el caso del bloque suelo-cemento, la etapa de fabricación también representa el mayor impacto, aunque con una menor demanda energética. No obstante, el uso del cemento influye de manera significativa en el incremento de emisiones. A diferencia del ladrillo cerámico, los

impactos del bloque suelo-cemento se distribuyen de forma más uniforme a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida.

Con estos resultados, se puede ver que, aunque ambos materiales presentan impactos en la etapa de fabricación, la naturaleza de dichos impactos es diferente, lo que influye en su comportamiento ambiental global.

Los resultados del inventario de ciclo de vida permiten explicar el comportamiento observado en la evaluación mediante la matriz CONESA, ya que reflejan diferencias en el consumo de energía, uso de materiales y generación de emisiones entre ambos sistemas constructivos.

7.3 Metodología de la matriz CONESA

La evaluación de los impactos ambientales se realizó mediante la matriz CONESA [27], que permite valorar la importancia de los impactos ambientales a partir de criterios como intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad y recuperabilidad. Estos criterios se aplicaron a cada una de las actividades identificadas en el ciclo de vida de los materiales analizados.

A cada impacto se le asignaron valores numéricos, cuya suma permitió obtener el valor de importancia del impacto (IM). Este procedimiento facilitó la jerarquización de los impactos y la comparación entre los materiales evaluados. Las matrices CONESA completas utilizadas en el análisis se presentan en el Anexo C.

7.3.1 Evaluación mediante matriz

En la tabla 8 se representan los resultados consolidados de la evaluación mediante la matriz CONESA.

Tabla 8. Resultados de la matriz CONESA

Material	Número de impactos	Total, IM	Promedio	Clasificación
Ladrillo cerámico tipo Temosa	24	988	41.2	Moderado–Severo
Bloque suelo-cemento	33	1515	45.9	Severo

Nota: La tabla fue elaborada con base en los resultados obtenidos mediante la aplicación de la matriz CONESA [27].

Los resultados obtenidos indican que el ladrillo cerámico tipo Temosa presenta un impacto ambiental global de 988, mientras que el bloque suelo-cemento alcanza un valor de 1515, lo que indica una mayor carga ambiental en este último.

7.3.2 Análisis comparativo

De forma general, el análisis comparativo muestra que el bloque suelo-cemento presenta un mayor impacto ambiental total en relación con el ladrillo cerámico tipo Temosa. En el caso del ladrillo cerámico, los impactos más significativos se concentran en la etapa de fabricación, particularmente en el proceso de cocción, el cual implica un alto consumo energético y la generación de emisiones atmosféricas. Por su parte, el bloque suelo-cemento, aunque no requiere cocción, presenta impactos asociados al uso de cemento y a la acumulación de efectos a lo largo de las diferentes etapas evaluadas, lo que incrementa su valor total de impacto.

7.3.3 Análisis diferencial de impactos

Además del análisis del impacto total, se realizó una evaluación comparativa de los impactos específicos identificados en cada material, con el fin de comprender las diferencias en su comportamiento ambiental.

En el caso del ladrillo cerámico tipo Temosa, los impactos más significativos se asocian a:

- Emisiones de dióxido de carbono (CO₂)
- Consumo energético en procesos de cocción
- Generación de contaminantes atmosféricos (material particulado y óxidos de nitrógeno)

Estos impactos presentan valores elevados dentro de la matriz, lo que muestra que el proceso térmico de fabricación constituye el principal factor de afectación ambiental.

Por otro lado, el bloque suelo-cemento presenta un comportamiento diferente. En este caso, los impactos más relevantes se relacionan con:

- Uso de cemento como materia prima
- Consumo de recursos naturales
- Generación de residuos en las etapas constructivas

A diferencia del ladrillo cerámico, los impactos del bloque suelo-cemento no se concentran en un solo proceso, sino que se distribuyen a lo largo de varias etapas del ciclo de vida, lo que genera una acumulación de impactos de magnitud moderada a alta.

Con este análisis, se puede ver que, mientras el ladrillo cerámico presenta impactos intensivos en una etapa específica (fabricación), el bloque suelo-cemento presenta impactos más distribuidos, lo que influye en su mayor valor total dentro de la matriz.

En consecuencia, la diferencia entre ambos materiales no solo radica en la magnitud del impacto, sino también en la naturaleza y distribución de estos a lo largo del ciclo de vida.

Tabla 9. *Comparación de impactos dominantes*

Tipo de impacto	Temosa	Suelo-cemento
CO ₂	Alto	Medio
Energía	Alto	Bajo
Uso de cemento	Bajo	Alto

Residuos	Medio	Medio
Contaminación aire	Alto	Medio

Nota: La tabla fue elaborada con base en los resultados obtenidos del análisis comparativo de los impactos ambientales identificados en los materiales evaluados.

8. Discusión

Los resultados difieren parcialmente de lo reportado en la literatura, donde el bloque suelo-cemento suele considerarse una alternativa de menor impacto ambiental frente a los materiales cerámicos tradicionales [23], [24]. Esta diferencia puede explicarse por la metodología empleada en la presente investigación, ya que la matriz CONESA depende de la valoración asignada a cada impacto y de la acumulación de variables consideradas dentro del análisis. En este estudio, la incidencia del cemento Portland y la acumulación de impactos moderados asociados al consumo de agua, extracción de suelo y generación de residuos influyeron significativamente en el incremento del valor total obtenido para el bloque suelo-cemento.

Por otra parte, aunque el ladrillo cerámico presentó impactos importantes relacionados con el consumo energético y las emisiones atmosféricas derivadas del proceso de cocción, dichos impactos se concentraron principalmente en una etapa específica del ciclo de vida. Este comportamiento coincide con investigaciones desarrolladas por Koroneos y Dompros [5] y Zhang et al. [22], quienes identificaron que la etapa térmica representa uno de los principales focos de impacto ambiental en la producción de materiales cerámicos debido al uso intensivo de combustibles y energía. Sin embargo, los resultados del presente estudio evidencian que la eliminación de la cocción no garantiza necesariamente un menor impacto ambiental global cuando intervienen materiales con alta carga ambiental como el cemento Portland.

Asimismo, los resultados evidencian que el desempeño ambiental de los materiales no depende únicamente de los procesos de fabricación, sino también de factores asociados a las

materias primas utilizadas, la eficiencia de los procesos productivos y las condiciones de construcción. Variables como el desperdicio generado en obra, el consumo de mortero y agua, así como las características del sistema constructivo, influyen directamente en la magnitud de los impactos ambientales evaluados. Esto demuestra la importancia de considerar un enfoque integral durante la selección de materiales para edificaciones sostenibles.

Adicionalmente, es importante reconocer que los resultados pueden verse influenciados por ciertas limitaciones metodológicas relacionadas con la disponibilidad de información local y el uso de factores de emisión secundarios. De igual manera, la exclusión de variables como transporte, mantenimiento y disposición final podría modificar el comportamiento ambiental de los materiales evaluados bajo condiciones reales de aplicación. Por esta razón, se recomienda que futuras investigaciones complementen el análisis mediante software especializado de análisis de ciclo de vida, bases de datos regionales y análisis de sensibilidad que permitan obtener resultados más precisos y comparables en el contexto colombiano.

9. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

1. El análisis de ciclo de vida permitió identificar que la etapa de fabricación es la que genera el mayor impacto ambiental en ambos materiales, debido al consumo de energía, uso de recursos naturales y las emisiones asociadas a los procesos productivos.
2. El ladrillo cerámico tipo Temosa presenta impactos significativos concentrados en el proceso de cocción, el cual implica altas demandas energéticas y la generación de emisiones de gases contaminantes, constituyéndose como su principal punto crítico ambiental.

3. El bloque suelo-cemento, aunque elimina el proceso de cocción, presenta impactos relevantes asociados al uso de cemento, lo que influye de manera significativa en desempeño ambiental global.

4. Los resultados obtenidos mediante la matriz CONESA evidenciaron que el bloque suelo-cemento presenta un mayor impacto ambiental total en comparación con el ladrillo cerámico tipo Temosa, lo cual se relaciona con la acumulación de impactos y la valoración asignada a los criterios evaluados.

5. En este trabajo, el análisis diferencial permitió identificar que el ladrillo cerámico concentra impactos de alta intensidad en una etapa específica, mientras que el bloque suelo-cemento presenta impactos distribuidos a lo largo de su ciclo de vida, lo que explica su mayor valor acumulado.

6. La aplicación de la matriz CONESA resultó útil para la jerarquización de impactos ambientales; sin embargo, sus resultados dependen de la metodología y de los criterios de valoración, por lo que es conveniente complementarla con herramientas cuantitativas como el análisis de ciclo de vida.

9.2 Recomendaciones

1. Se recomienda, en futuros estudios, ampliar el análisis mediante herramientas cuantitativas más avanzadas, como software especializado en análisis de ciclo de vida, con el fin de profundizar en el nivel de detalle y el alcance de los resultados obtenidos.

2. Se sugiere incorporar la etapa de transporte en evaluaciones posteriores, considerando su posible influencia en el impacto ambiental total de los materiales analizados.

3. Se recomienda analizar diferentes proporciones de cemento en el bloque suelo-cemento, con el objetivo de optimizar su desempeño ambiental y reducir los impactos asociados a su producción.

4. Se recomienda promover la implementación de tecnologías más eficientes en la fabricación de ladrillos cerámicos, especialmente en los procesos de cocción, con el fin de disminuir el consumo energético y las emisiones contaminantes.

5. Se sugiere fomentar el uso de materiales locales y estrategias constructivas sostenibles que contribuyan a la reducción del impacto ambiental en el sector de la construcción.

10. Referencias

[1] United Nations Environment Programme (UNEP), Global Status Report for Buildings and Construction 2020. Nairobi, Kenya: UNEP, 2020.

[2] L. F. Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez and A. Castell, “Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 394–416, 2014.

[3] C. J. Kibert, *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2016.

[4] H. W. Kua, “Integrated policies to promote sustainable use of construction materials,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 18, pp. 1–11, 2015.

[5] C. Koroneos and A. Dompros, “Environmental assessment of brick production in Greece,” *Building and Environment*, vol. 42, no. 5, pp. 2114–2123, 2007.

- [6] C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi and A. Jullien, “Environmental impact of cement production: Detail of the different processes and cement plant variability evaluation,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, no. 5, pp. 478–485, 2010.
- [7] International Organization for Standardization, ISO 14040: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.
- [8] International Organization for Standardization, ISO 14044: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.
- [9] J. B. Guinée, *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [10] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum and S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham, Switzerland: Springer, 2018.
- [11] F. Pomponi and A. Moncaster, “Scrutinising embodied carbon in buildings: The next performance gap made manifest,” *Energy and Buildings*, vol. 153, pp. 710–718, 2017.
- [12] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), *Cuentas Nacionales: Sector Construcción*. Bogotá, Colombia, 2023.
- [13] Cámara Colombiana de la Construcción (Camacol), *Informe Económico del Sector de la Construcción*. Bogotá, Colombia, 2022.
- [14] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 472 de 2017: *Gestión de Residuos de Construcción y Demolición*. Bogotá, Colombia, 2017.
- [15] Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, *Política Nacional de Edificaciones Sostenibles*. Bogotá, Colombia, 2020.

- [16] O. Ortiz-Rodríguez, F. Castells and G. Sonnemann, “Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development,” *Science of the Total Environment*, vol. 408, no. 12, pp. 2435–2443, 2010.
- [17] J. García and A. Caballero, “Energía incorporada en materiales de construcción en Colombia,” *Revista Ingeniería y Universidad*, 2019.
- [18] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th ed. Harlow, U.K.: Pearson, 2011.
- [19] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2014.
- [20] M. F. Ashby, *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [21] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, *Guía de Construcción Sostenible para el Ahorro de Agua y Energía en Edificaciones*. Bogotá, Colombia, 2015.
- [22] X. Zhang, F. Wang and S. Hu, “Carbon footprint of fired clay bricks in China,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 280, 124406, 2021.
- [23] L. Ben-Alon, V. Loftness, K. A. Harries, G. DiPietro and E. Hameen, “Cradle-to-site life cycle assessment of natural vs. conventional building materials,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 254, 120046, 2020.
- [24] A. Silva, J. de Brito and R. Dhir, “Comparative life cycle assessment of masonry units,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 2071–2081, 2018.
- [25] M. F. Hernández-Zamora, S. I. Jiménez-Martínez and J. I. Sánchez-Monge, “Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción,” *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 34, no. 2, pp. 3–10, 2021.

[26] M. A. Gonzalez Stumpf, M. P. Kulakowski, L. G. Breitenbach y F. Kirch Baliza, “A case study about embodied energy in concrete and structural masonry buildings,” *Revista de la Construcción*, vol. 13, no. 2, pp. 9–14, Aug. 2014, doi: 10.4067/S0718-915X2014000200001.

[27] V. Conesa Fernández-Vítora, *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*, 4.^a ed. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa, 2010.

[28] Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), Factores de Emisión de CO₂ del Sistema Energético Colombiano. Bogotá, Colombia, 2020.

[29] United States Environmental Protection Agency, AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors, 5th ed. Washington, DC, USA: EPA, 1995.

[30] Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama, Japan: IGES, 2006.

[31] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Resolución 620 de 2008: Normas Técnicas Catastrales. Bogotá, Colombia, 2008.

[32] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), AP-42: *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources, Section 13.2.4—Aggregate Handling and Storage Piles*. Washington, DC, USA: EPA, Jan. 1995. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-13-miscellaneous-0>.

[33] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Guía Ambiental para el Subsector Ladrillero. Bogotá, Colombia, 2002.

[34] B. V. Venkatarama Reddy, “Sustainable building technologies,” *Current Science*, vol. 87, no. 7, pp. 899–907, Oct. 2004.

[35] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, Título D. Bogotá, Colombia, 2010.

[36] Global Cement and Concrete Association (GCCA), *GNR 2.0 – GCCA in NumbeRs: Cement and Concrete Industry Environmental Data*. London, U.K.: Global Cement and Concrete Association, 2025. [Online]. Available: https://gccassociation.org/gnr/?utm_source.

[37] Cámara Colombiana del Cemento y el Concreto (PROCEMCO), Información técnica y estadísticas del sector cementero colombiano. Bogotá, Colombia.

Apéndices

Apéndice A. Cálculo del peso de los muros

La determinación del peso de los muros se consideró una unidad funcional de 1 m², teniendo en cuenta las dimensiones de las unidades de mampostería, su peso unitario y el mortero de pega.

1. Ladrillo cerámico tipo Temosa

Para calcular el peso exacto de 1m² de muro con ladrillo cerámico macizo de temosa con dimensiones $0.24m \times 0.12m \times 0.06m$ se realiza el cálculo de volumen por unidad, peso por densidad, y cantidad de unidades de ladrillo para el muro.

1.1 Volumen y peso de un ladrillo

Al ser un ladrillo macizo, no tiene huecos que resten peso. Se usa la densidad promedio para la arcilla cocida que es de $1800 \text{ Kg}/\text{m}^3$, entonces:

$$\text{Volumen} = 0.24m \times 0.12m \times 0.06m$$

$$\text{Volumen} = 0.001728m^3$$

Para el peso unitario se usa el volumen hallado anteriormente por la densidad de la arcilla cocida, entonces:

$$\text{Peso unitario} = 0.001728m^3 \times 1800 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$\text{Peso unitario} = 3.11Kg$$

1.2 Cantidad de ladrillos por m^2

Al tomase como base un muro de $1m^2$, sumando la junta con mortero de $0.015m$, entonces:

$$\text{Área conjunta} = (0.24m + 0.015m) \times (0.06m + 0.015m)$$

$$\text{Área conjunta} = 0.0192m^2$$

Para calcular el número de ladrillos por metro cuadrado se divide el metro cuadro entre el área conjunta calculada anteriormente, entonces:

$$\text{Unidades por } m^2 = \frac{1m^2}{0.0192m^2}$$

$$\text{Unidades por } m^2 \cong 52 \text{ ladrillos}$$

1.3 Peso total del muro de $1m^2$

Al momento de hallar el peso total del muro se tiene en cuenta el peso del mortero para el que se realiza inicialmente el cálculo de su volumen.

Teniendo en cuenta el espesor del ladrillo de temosa el cual es de $0.12m$ se realiza el cálculo del volumen total del muro:

$$Volumen\ muro = 1m^2 \times 0.12m$$

$$Volumen\ muro = 0.12m^3$$

Se calcula el espacio físico que ocupan los 52 ladrillos necesarios para construir el muro

$$Volumen_{52\ ladrillos} = 52 \times 0.001728m^3$$

$$Volumen_{52\ ladrillos} = 0.09m^3$$

Entonces la diferencia entre el espacio total del muro y el volumen total de los ladrillos usados da como resultado el volumen del mortero.

$$Volumen\ mortero = 0.12m^3 - 0.09m^3$$

$$Volumen\ mortero = 0.03m^3$$

La densidad promedio del mortero (arena + cemento + agua) es de aproximadamente $2100\text{ Kg}/m^3$

$$Peso\ mortero = 0.03m^3 \times 2100\text{ Kg}/m^3$$

$$Peso\ mortero \cong 63Kg$$

Se realiza el cálculo del peso total de los ladrillos usados para la construcción del muro, entonces:

$$Peso_{52 \text{ ladrillos}} = 3.11Kg \times 52$$

$$Peso_{52 \text{ ladrillos}} = 161.72Kg$$

Finalmente se suma tanto el peso del mortero como el peso total de los ladrillos usados para el m^2 de muro

$$Peso \text{ total del muro} = 161.72Kg + 63Kg$$

$$Peso \text{ total del muro} \cong 225Kg$$

2. Bloque suelo – cemento

Para calcular el peso exacto de $1m^2$ de muro con ladrillo cerámico macizo de temosa con dimensiones $0.30m \times 0.15m \times 0.10m$ se realiza el cálculo de volumen por unidad, peso por densidad, y cantidad de unidades de ladrillo para el muro.

2.1 Volumen y peso de un ladrillo

Al ser un ladrillo macizo, no tiene huecos que resten peso. Se usa la densidad promedio para suelo-cemento que es de $1900 \text{ Kg}/m^3$, entonces:

$$Volumen = 0.30m \times 0.15m \times 0.10m$$

$$Volumen = 0.0045m^3$$

Para el peso unitario se usa el volumen hallado anteriormente por la densidad de la arcilla cocida, entonces:

$$Peso\ unitario = 0.0045m^3 \times 1900 \frac{Kg}{m^3}$$

$$Peso\ unitario = 8.551Kg$$

2.2 Cantidad de ladrillos por m^2

Al tomase como base un muro de $1m^2$, sumando la junta con mortero de $0.015m$, entonces:

$$\text{Área conjunta} = (0.30m + 0.015m) \times (0.10m + 0.015m)$$

$$\text{Área conjunta} = 0.036225m^2$$

Para calcular el número de ladrillos por metro cuadrado se divide el metro cuadro entre el área conjunta calculada anteriormente, entonces:

$$Unidades\ por\ m^2 = \frac{1m^2}{0.036225m^2}$$

$$Unidades\ por\ m^2 \cong 28\ ladrillos$$

2.3 Peso total del muro de $1m^2$

Al momento de hallar el peso total del muro se tiene en cuenta el peso del mortero para el que se realiza inicialmente el cálculo de su volumen.

Teniendo en cuenta el espesor del bloque suelo-cemento el cual es de 0.10m se realiza el cálculo del volumen total del muro:

$$Volumen\ muro = 1m^2 \times 0.15m$$

$$Volumen\ muro = 0.15m^3$$

Se calcula el espacio físico que ocupan los 28 ladrillos necesarios para construir el muro

$$Volumen_{28\ ladrillos} = 28 \times 0.0045m^3$$

$$Volumen_{28\ ladrillos} = 0.126m^3$$

Entonces la diferencia entre el espacio total del muro y el volumen total de los ladrillos usados da como resultado el volumen del mortero.

$$Volumen\ mortero = 0.15m^3 - 0.126m^3$$

$$Volumen\ mortero = 0.024m^3$$

La densidad promedio del mortero (arena + cemento + agua) es de aproximadamente $2100 \text{ Kg}/\text{m}^3$

$$\text{Peso mortero} = 0.024\text{m}^3 \times 2100 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$\text{Peso mortero} \cong 50.4\text{Kg}$$

Se realiza el cálculo del peso total de los ladrillos usados para la construcción del muro, entonces:

$$\text{Peso}_{28 \text{ ladrillos}} = 8.551\text{Kg} \times 28$$

$$\text{Peso}_{28 \text{ ladrillos}} = 239.43\text{Kg}$$

Finalmente se suma tanto el peso del mortero como el peso total de los ladrillos usados para el m^2 de muro

$$\text{Peso total del muro} = 239.43\text{Kg} + 50.4\text{Kg}$$

$$\text{Peso total del muro} \cong 290\text{Kg}$$

Apéndice B. Cálculo del inventario de ciclo de vida**1. Ladrillo cerámico temosa****1.1 Extracción de arcilla****1.1.1 Entradas:**

Se realiza un balance de masa que tiene en cuenta las pérdidas del proceso industrial para saber cuántos kilogramos de arcilla virgen se necesitan para $1m^2$ de muro. Se parte del producto final, como se definió en el Anexo A se usan 162Kg de ladrillo cocido. Sin embargo, la arcilla en la mina no es igual al ladrillo terminado puesto que cuando la arcilla entra al horno a $950^{\circ}C$ pierde peso químicamente (se queman materias orgánicas y se libera agua de constitución). En las arcillas de la región esta pérdida es de aproximadamente 7%. Entonces:

$$Arcilla\ seca = \frac{162Kg}{(1 - 0.07)}$$

$$Arcilla\ seca = 174.2Kg$$

En la fabricación (moldeo, secado y carga del horno túnel), siempre hay ladrillos que se rompen o salen defectuosos. Se estima una merma del 2%.

$$\frac{162Kg}{(1 - 0.07)} \cong 178Kg$$

1.1.2 Salidas:

- **Perdida del suelo**

Para extraer los 178Kg necesarios de arcilla para el $1m^2$ de muro no solo se quita ese peso, sino que se remueven capas superiores, para esto se realiza en calculo total del volumen removido de suelo considerando que la densidad de la arcilla in situ es de $1600 \text{ Kg}/m^3$

$$\text{Volumen removido} = \frac{178Kg}{1600 \text{ Kg}/m^3}$$

$$\text{Volumen removido} = 0.11m^3$$

- **Material particulado (PM_{10})**

Para la extracción y carga de materiales húmedos (como la arcilla de cantera), el factor de emisión para Partículas Suspensas Totales (PST) o se calcula con la fórmula de "Carga de material"

$$E = k \times 0.0016 \times \frac{\left(\frac{U}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1.4}}$$

Donde,

$k = 0.35$ (constante para tamaño de particula)

$U = \frac{2.5m}{s}$ (Velocidad del viento promedio de Norte de Santander)

$M = 10\%$ (*Humedad de arcilla*)

Entonces,

$$E = 0.35 \times 0.0016 \times \frac{\left(\frac{2.5 \text{ m/s}}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{0.1}{2}\right)^{1.4}}$$

$$E = 0.012 \text{ Kg/Tonelada}$$

Por lo tanto, si para construir un muro de 1m^2 se extraen 178Kg de arcilla (0.178 toneladas), la emisión de material particulado PM_{10} es:

$$E = 0.012 \text{ Kg/Tonelada} \times 0.178 \text{ Ton}$$

$$E \cong 2.14 \text{ gr}$$

- **Ruido**

En cuanto al ruido se mide en decibelios y es según la maquinaria usada en este caso una retroexcavadora, la cual genera un ruido entre 85-90dB.

- **Suministro energético**

Para los cálculos de las emisiones fugitivas de metano (CH_4) el cual depende de la infraestructura de transporte y distribución del gasoducto y no de la eficiencia del horno túnel.

En Colombia se den usar factores de emisión (FE) publicados por la UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética) o los estándares de IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático) que es la base que usa el Ministerio de Ambiente; en este caso se usan las directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (capítulo de Emisiones Fugitivas).

En cuanto al consumo de gas natural se hace el cálculo de ingeniería térmica basado en la masa del ladrillo que se va a cocer; este consumo depende de la energía necesaria para calentar la arcilla hasta su punto de vitrificación aproximadamente $950^{\circ}C$. La fórmula base es:

$$C_g = \frac{\text{Masa del ladrillo} \times \text{Consumo Energético Específico}}{\text{Poder Calorífico del Gas}}$$

Para el horno túnel que es eficiente porque recupera calor, se utiliza los siguientes valores:

- Consumo energético específico consumo entre 2.2- 2.7MJ (Mega Joules) por cada kilogramo de ladrillo macizo. En este caso se usará el valor de 2.7MJ/Kg.
- Poder calorífico del gas natural: En Colombia, el gas natural tiene un promedio de 35MJ por cada metro cubico.

$$C_g = \frac{178Kg \times 2.7MJ}{35MJ}$$

$$C_g = 12.5m^3$$

El IPCC establece que en sistemas de distribución de gas natural el factor promedio es de 0.0012Kg de CH_4 por cada GJ (Giga Joule) de energía transportada. Entonces, para la emisión fugitiva,

$$Emisión = Energía \times FE$$

$$Emisión = \left(12.5m^3 \times \frac{0.038GJ}{1m^3} \right) \times 0.0012KG$$

$$Emisión = 0.57gr \text{ de } CH_4$$

1 Fabricación

2.1 Preparación y mezcla

2.1.1 Entradas:

En esta etapa se separa el recurso hídrico (agua) del consumo energético. Estos datos se basan en la estequiometría de la pasta y la potencia de la maquinaria.

- **Cantidad de agua usada.**

Este recurso es indispensable para formar la masa del ladrillo; la arcilla necesita una humedad entre el 18% al 20% para ser extruida (moldeada). Para estos cálculos se toma un valor del 20% de humedad. Entonces:

$$Agua \text{ de moldeo} = 178Kg \times 0.20$$

$$\text{Agua de moldeo} = 35.6 \text{ Litros}$$

Energía eléctrica.

Para esto se basó en el consumo específico de energía eléctrica por tonelada producida en plantas con molienda y extrusión automática. Según la UPME y estudios de la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS) para el sector el consumo eléctrico promedio es de 25kWh por tonelada de ladrillo, entonces:

$$\text{Consumo de energía eléctrica} = 0.162 \text{ toneladas} \times 25kWh$$

$$\text{Consumo de energía eléctrica} = 4.05kWh$$

2.1.2 Salidas:

Ruido de molienda

En las fichas técnicas molinos el nivel de presión sonora en estas áreas oscila entre 85 y 95 dB.

2.2 Secado

En cuanto al secado se debe cuantificar cuanta energía se aprovecha del horno y cuanta agua se evapora físicamente del ladrillo antes de entrar a la cocción.

2.2.1 Entradas

- **Aire caliente residual:**

El secadero no usa un quemador propio, sino que "recicla" el calor que sale del Horno Túnel (zona de enfriamiento) se considera un Impacto Positivo o una medida de ecoeficiencia, ya

que no estás quemando gas extra para secar, sino reutilizando un residuo térmico, por esto, el cálculo se basa en la energía necesaria para evaporar el agua de moldeo.

Para evaporar 1Kg de agua se necesitan aproximadamente 2.5MJ basado en calor latente de evaporación. Entonces,

$$35.6Kg \times 2.5MJ = 89MJ/Kg$$

2.2.1 Salidas

- **Vapor de agua:** este cálculo es equivalente al agua de moldeo que se evapora durante el secado de los primeros 100°C de la cocción. El ladrillo no puede entrar al fuego del horno túnel con esa agua, porque estallaría por la presión interna del vapor. Por eso pasa por el secadero donde se elimina el "agua libre" (la que se añade para moldear). El calor del ambiente o del aire recuperado del horno convierte esos 35.6 kg de agua líquida en vapor.
- **Partículas (polvo):** aunque es vapor "limpio", el flujo de aire de los ventiladores del secadero arrastra pequeñas partículas. Se estima que un 0.5% de la masa evaporada es polvo residual, por ende,

$$35.6Kg \times 0.005 = 0.17Kg$$

3 Cocción (Horno Túnel)

Para obtener estos datos, se realiza un cálculo de estequiometría de la combustión (la química del fuego) que dependen directamente de la masa de tu muro y de la eficiencia térmica del horno túnel de Temosa.

3.1 Entrada

3.1.1 Consumo de gas

El cálculo del consumo de gas natural asociado al sistema fue previamente desarrollado en el ítem 1.2, denominado “Suministro energético”, donde se estimó el requerimiento energético para la producción del ladrillo cerámico Temosa macizo. A partir de dicho análisis, se determinó el consumo específico de gas natural necesario para la fabricación del material requerido por metro cuadrado de muro.

3.1.2 Energía térmica

Este valor representa el calor neto que el gas natural transfiere a los ladrillos para que se cocinen que es de 35MJ por cada m^3 . Se basa en el consumo de gas que ya se halló $12.5m^3$. Los hornos túnel modernos tienen una eficiencia térmica del 95% al 98% en la combustión, para este cálculo se utiliza el 98%. Entonces,

$$Energía\ térmica = \left(12.5m^3 \times 35 \frac{MJ}{m^3}\right) \times 0.98$$

$$Energía\ térmica = 430MJ$$

Se redondea a 450MJ para incluir el precalentamiento de los vagones del horno.

3.2 Salida

Emisiones de CO_2

Una vez que se conoce el volumen de gas quemado se aplica el factor de emisión oficial para Colombia el que, según la UPME y el IPCC, la combustión de gas natural libera 1.96Kg de CO_2 por cada metro cubico consumido.

$$CO_2 = 12.5m^3 \times 1.96 \text{ Kg}/m^3$$

$$CO_2 = 24.5Kg$$

- Trazas de NO_x

Los óxidos de nitrógeno no vienen del gas, sino del aire que entra al horno. Al calentarse a 950°C, el nitrógeno del aire reacciona con el oxígeno. El factor de emisión estándar EPA AP-42 (Sección 1.4) para combustión de gas natural, emisiones de NO_x en hornos es de $\frac{100lb}{10^6scf}$ (libras por cada millón de pies cúbicos estándar).

$$Emision\ de\ NO_x = 12.5m^3 \times \left(\frac{100lb}{10^6ft^3} \times \frac{45.36Kg}{28.317m^3} \right)$$

$$Emision\ de\ NO_x = 0.02Kg$$

Emisión de calor

No toda la energía se queda en el ladrillo (el ladrillo se enfría antes de salir). El calor que sale por la chimenea o por las paredes del horno. Un horno túnel recupera casi todo el calor para el secadero, pero pierde aproximadamente un 15% por las paredes y la chimenea de evacuación.

$$\text{Calor emitido} = 450\text{MJ} \times 0.15$$

$$\text{Calor emitido} = 67.5\text{MJ}$$

4 Construcción

Para calcular los datos de la etapa, se debe cuantificar los materiales que realmente se manipulan en la obra y las mermas que se convierten en residuos.

1.1 Preparación de mezcla

Para los 63Kg de mezcla que se calcularon en el Anexo A, se usa la relación agua/cemento estándar establecidos en la norma NSR-10 (relación 1:4); el cemento representa aproximadamente el 19% del peso total de los materiales secos.

$$\text{Cemento} = 63\text{Kg} \times 0.19$$

$$\text{Cemento} = 12\text{Kg}$$

Para que el mortero sea trabajable, pero mantenga su resistencia, se utiliza una relación A/C de 0.8 para morteros de pega (es más alta que en el concreto porque la arena y el ladrillo absorben agua).

$$\text{Litros de agua} = \text{Peso del cemento} \times \text{Relación} \frac{A}{C}$$

$$\text{Litros de agua} = 9.6 \text{ Litros}$$

Se hace un ajuste técnico a 9.4 litros considerando que la arena de la zona suele tener una humedad natural del 1-2%, lo que aporta unos 200 ml de agua extra, reduciendo la necesidad de agua.

2. Levantamiento de muro

5.1 Desperdicio de mezcla (mortero)

En la construcción, se estima una pérdida del 5% al 10% de la mezcla por caída al suelo o endurecimiento en el recipiente. Se usa un 7% de pérdida para los cálculos. Entonces,

$$\text{Residuo mortero fresco} = 63 \text{ Kg} \times 0.07$$

$$\text{Residuo mortero fresco} = 4.41 \text{ Kg}$$

5.2 Material particulado

Al preparar los 63Kg de mortero, se deben abrir sacos de cemento y mezclar con arena seca. Según factores de emisión para construcción el 1% de masa del cemento se dispersa como polvo fino. El mortero tiene 12Kg de cemento por cada m^2 de muro. Entonces,

$$\text{Polvo cemento} = 12Kg \times 0.01$$

$$\text{Polvo cemento} = 120gr$$

5.3 Residuos (ladrillo roto)

Durante el transporte interno y el ajuste de medidas (cortes para esquinas), se estima una rotura del 3%, entonces,

$$162Kg \times 0.03 = 4.86Kg$$

3. Fin de vida

Para calcular esta etapa, se debe proyectar qué sucede con el muro después de su vida útil 70 años aproximadamente conforme a la normativa se utiliza lo establecido en la Resolución 620 del 2008 emitida por el IGAC, la cual ha definido: “Artículo 2° - Parágrafo Para inmuebles cuyo sistema constructivo sea muros de carga, la vida útil será de 70 años. Los cálculos se basan en la Ley de Conservación de la Masa y en indicadores de eficiencia de maquinaria de demolición.

Para el Fin de Vida, se calculó una salida de 225 kg de residuos pétreos (RCD), manteniendo la integridad de la masa inicial del muro.

Energía mecánica

Para derribar un muro macizo de $1m^2$ se requiere el uso de herramientas eléctricas (rotomartillo) o maquinaria pesada (retroexcavadora con martillo). Para este proyecto se estima demolición con rotomartillo, lo que estima un consumo de 0.5kWh de energía eléctrica.

Si se usa esta herramienta de 1500W durante 20 minutos para demoler el muro de $1m^2$, entonces:

$$Energía = 1.5kW \times 0.33h$$

$$Energía = 0.5kWh$$

3.1 Emisión de material particulado (PM_{10})

La demolición es una de las etapas que mas polvo genera. Según la EPA el factor de emisión de material particulado es de aproximadamente 0.00085Kg por cada Kg de material demolido.

$$PM_{10} = 225Kg \times 0.00085$$

$$PM_{10} = 190gr$$

2. Ladrillo bloque suelo-cemento

1.1 Extracción de materiales

2.1.1 Entrada.

Se realiza un balance de masa que considera la materia prima neta y la capa de suelo inerte (estéril) que debe removerse para llegar a la arcilla/tierra aprovechable. Inicialmente se suma todo el material sólido que terminará formando parte del muro de $1m^2$

Se define que para los 239.43Kg de ladrillo suelo-cemento (Anexo A), el 90% es tierra,

$$239.43Kg \times 0.90 = 215.48Kg$$

En cuanto al mortero de pega que tienen un peso de 50.4Kg (Anexo A) se hace una proporción de 1:4, en donde la arena representa el 80%, entonces:

$$50.4Kg \times 0.80 = 40.32Kg$$

Por último, se suman estos dos materiales en donde se obtiene un 255.8Kg de material útil.

En la extracción a cielo abierto, hay mermas por humedad natural y desperdicio en el transporte interno que es de aproximadamente del 3%.

$$\frac{255.8Kg}{0.97} = 263.8Kg$$

Se redondea a 264Kg de material total que se debe remover de la cantera.

2.1.2 Salida

Perdida del suelo.

Antes de llegar a la tierra "limpia", se debe quitar la capa orgánica superficial (horizonte O y A) que no sirve para fabricar ladrillos. Se estima que, para extraer 1 tonelada de material útil, se remueven un 10% de materiales estériles o capa vegetal.

$$264Kg \times 0.10 = 26.4Kg$$

Trazas de polvo PM_{10}

Se llaman trazas pues es una cantidad muy pequeña de material particulado. Se utiliza el factor de emisión para excavación por tonelada movida. Por lo tanto, si para construir un muro de $1m^2$ se extraen 264Kg de suelo (0.264 toneladas), la emisión de material particulado PM_{10} es:

$$E = 0.012 \text{ Kg/Tonelada} \times 0.264 \text{ Ton}$$

$$E = 0.11 \text{ Kg}$$

3. Fabricación de cemento Portland

3.1 Entradas

Caliza y arcilla

Para fabricar cemento, se requiere más materia prima de la que se obtiene al final debido a las pérdidas en el horno. Se necesitan aproximadamente 1.5 kg de crudo (mezcla de caliza y arcilla) por cada kg de Clinker/cemento.

$$\text{Cantidad caliza} - \text{arcilla} = \text{Cemento necesario} \times \text{Factor de corrección}$$

$$\text{Cantidad caliza} - \text{arcilla} = 36.4 \text{ Kg} \times 1.1$$

$$\text{Cantidad caliza} - \text{arcilla} = 40.3 \text{ Kg}$$

En la mezcla de fabricación del Clinker (el componente principal del cemento Portland), la relación típica es de 4 partes de caliza por 1 parte de arcilla (proporción 80/20).

$$Caliza = 40.3Kg \times 0.80$$

$$Caliza = 32.24Kg$$

La caliza aporta el Carbonato de Calcio ($CaCO_3$). Es el material que genera la mayor salida de CO_2 por proceso químico al calcinarse en el horno.

La arcilla aporta los silicatos y aluminatos necesarios para la resistencia del cemento. A diferencia de la caliza, su pérdida de masa en el horno es menor (principalmente agua de constitución).

$$Arcilla = 40.3Kg \times 0.20$$

$$Caliza = 8.06Kg$$

Electricidad

Este consumo se da principalmente en los molinos de crudo y de cemento final. La industria cementera consume entre 60 y 100 kWh por tonelada. Se usará un promedio eficiente de 71 kWh/ton.

$$\frac{36.4Kg}{1000} \times 71kWh \cong 2.6kWh$$

Calor

Es la energía necesaria para la des carbonatación y clinkerización en el horno rotatorio.

Un horno rotatorio con precalcinador consume 2900MJ por tonelada de clinker.

$$36.4Kg \times 2900MJ = 104MJ$$

Gas natural

El gas natural es el combustible que entrega los 104MJ de calor necesarios para el proceso. El poder calórico del gas en Colombia es de aproximadamente $35MJ/m^3$, el horno rotatorio con precalcinador tiene una eficiencia del 95%.

$$Volumen\ de\ gas = \frac{104MJ}{35MJ/m^3}$$

$$Volumen\ de\ gas \cong 3m^3$$

Yeso

El yeso representa un 5% del peso total del cemento por lo que se saca el cálculo con el peso total del cemento que se requiere.

$$36.4Kg \times 0.05 = 1.82Kg$$

3.2 Salida

Ruido

Se mide en decibelios (dB) y depende del tipo de motor. Se toman datos de las fichas técnicas de la maquinaria usada. Entonces, para la molienda se toman 95 dB teniendo en cuenta que son molinos de bolas y en cuanto a la parte del horno se toman 90 dB de ventiladores de tiro.

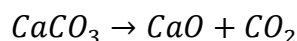
Material particulado PM_{10}

Es el material fino que escapa de los filtros de los molinos y el horno. El material particulado representa el 85% del polvo total en plantas tecnificadas. Se utiliza el factor de emisión estándar para plantas de cemento con **filtros de mangas** (tecnología que atrapa el polvo) que es de 0.37Kg/tonelada de cemento.

$$0.0364ton \times \frac{0.37Kg}{ton} = 0.013Kg$$

Proceso químico

Es el resultado de la des carbonatación de la caliza



Como el cemento no es 100% caliza lleva arcilla, yeso y otros aditivos, los científicos ambientales han calculado un promedio estándar (Factor IPCC / UPME) que establece que en promedio se generan 0.52 kg de CO_2 por cada kg de clinker el ingrediente principal del cemento producido.

$$36.4Kg \times 0.57 \cong 20.8Kg$$

Emisión CO_2

Por las propiedades químicas del gas natural que se distribuye en Colombia, la UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética) y el IPCC han estandarizado que por cada m^3 de gas que se quema, se liberan inevitablemente 1.96 kg de CO_2 .

Entonces al quemar $3m^3$ de gas natural para calentar el horno se tiene:

$$Emisión\ CO_2 = 3m^3 \times 1.96Kg$$

$$Emisión\ CO_2 = 5.88Kg$$

Emisión NO_x

Se generan por la alta temperatura dentro del horno rotatorio. Se toma un factor EPA de $1.6\ g/m^3$

$$Emisión\ NO_x = 3m^3 \times 1.6Kg$$

$$Emisión\ NO_x = 4.8\ Kg$$

Emisión SO_3

Se generan por la alta temperatura dentro del horno rotatorio Se toma un factor EPA de $1.6\ g/m^3$

$$Emisión SO_2 = 3m^3 \times 1.6Kg$$

$$Emisión SO_2 = 4.8 Kg$$

Emisión de CH_4

Son las fugas en la red de tuberías antes de llegar a la cementera. El **IPCC** (Panel Intergubernamental del Cambio Climático) establece que, por cada unidad de energía que viaja por la red, una pequeña fracción se escapa. El factor estándar para distribución de gas es de 1.2 de CH_4 por cada GJ de energía transportada.

$$Emisión de CH_4 = 0.104GJ \times 1.2gr$$

$$Emisión de CH_4 = 0.13gr$$

Calor residual

Es la energía térmica que se pierde por la chimenea y las paredes del horno. Se estima un porcentaje de pérdida del 10%.

$$104MJ \times 0.10 = 10.4MJ$$

3. Fabricación

3.1 Preparación (tamizado y triturado del suelo)

Entrada

- **Suelo crudo**

La masa de tierra necesaria para los 28 bloques incluyendo un 2% de desperdicio por finos que vuelan por el tamizado y sumándole un 12% de la humedad natural y merma da como resultado 245Kg de suelo crudo.

- **Energía eléctrica**

Hace referencia al consumo energético de los motores del molino de martillos y la zaranda vibratoria. Se estima que estas máquinas consumen 3kWh por tonelada de suelo procesado.

$$0.245ton \times 3kWh = 0.73kWh$$

Salida

- **Vibraciones mecánicas**

Corresponde a la frecuencia de oscilación de los motores eléctricos y las zarandas vibratorias conectadas a la red eléctrica estándar. Este dato se saca de la ficha técnica de la maquinaria industrial (trituradora de rodillos o molino de martillos), en este caso se establecen 60Hz de vibraciones.

- **Ruido**

Al igual que las vibraciones, el ruido se establece de 85dB sacado de la ficha técnica de la maquinaria industrial (tritadora de rodillos o molino de martillos).

- **Trazas de CO_2**

Estos son impactos indirectos asociados a la electricidad que usan las máquinas para triturar los 245 kg de suelo. Para hallar este valor, se usa el Factor de Emisión de la Red Eléctrica Nacional, En Colombia, generar 1 kWh de electricidad emite aprox. 0.126 kg de CO_2 (por las termoeléctricas que apoyan la red). Entonces,

$$0.8kWh \times \frac{0.126Kg}{kWh} = 0.1Kg$$

- **Trazas de metano**

Proviene de la descomposición de materia orgánica en las represas hidroeléctricas o fugas de gas en termoeléctricas. Para calcular cuánto se contamina al encender una máquina, no se mira la máquina, sino cómo se produjo la energía que llega a ella. El factor de CH_4 para la red eléctrica es aproximadamente 0.006 gramos de CH_4 por cada kWh consumido (esto incluye emisiones de embalses hidroeléctricos y quemas en termoeléctricas).

$$0.8kWh \times \frac{0.006g}{kWh} \cong 0.005g$$

3.2 Mezclado y prensado

4.2.1 Entrada

- **Cemento Portland**

Representa el estabilizante necesario para que la tierra compactada no se deshaga con el agua. En la técnica de suelo-cemento, se recomienda una proporción de cemento del 10% en peso para bloques macizos de alta calidad.

$$239.43Kg \times 0.10 = 23.94Kg$$

En el mezclado siempre hay pérdidas (material que se queda en la mezcladora o polvo). Se suma un 8% de seguridad.

$$23.94Kg \times 1.08 = 25.85Kg$$

- **Energía eléctrica**

Una prensa eléctrica promedio tiene un motor de 3 HP (2.2 kW) y produce aproximadamente 120 bloques por hora. Se realiza el cálculo del consumo del motor de la prensa hidráulica y la mezcladora mecánica para procesar los bloques de $1m^2$.

$$Tiempo\ para\ 1m^2 = \frac{28bloques}{120\ bloques/hora}$$

$$Tiempo\ para\ 1m^2 = 0.233horas$$

$$Consumo\ energia\ eléctrica = 2.2kW \times 0.233h$$

$$Consumo\ energia\ eléctrica = 0.51kWh$$

Salida

- **Material particulado PM_{10}**

El polvo no sale de una chimenea, sino del **vaciado del cemento** en la mezcladora. Se utiliza el factor para "Manejo y transferencia de materiales agregados" (EPA AP-42). Para el cemento en bulto, se estima que el **0.01%** de la masa se dispersa como polvo al ser manipulado.

$$PM_{10} = 26Kg \times 0.0001$$

$$PM_{10} = 0.0026Kg$$

- **Ruido**

El ruido es la suma de dos fuentes la mezcladora de eje vertical y la prensa hidráulica. Según fichas técnicas de maquinaria para bloques tipo Cinva-Ram motorizada o Eco-Bravo

- Mezcladora: 82 dB.
- Prensa Hidráulica: 88 dB.

Cuando dos máquinas funcionan a la vez, no se suman los números (82+88), sino sus energías. El resultado promedio para esta estación de trabajo es de 90 dB.

3.3 Curado

Para calcular los valores de la etapa de Curado del bloque de suelo-cemento, se debe considerar que este proceso dura varios días y requiere mantener la humedad para que el cemento reaccione químicamente (hidratación).

A. Entrada

A.1. Agua

Representa el agua de riego necesaria para que los bloques alcancen su resistencia máxima. A diferencia de la mezcla, esta agua se aplica externamente durante los primeros 7 a 28 días. Se estima un consumo de 0.9 Litros de agua por cada bloque para todo el proceso de curado asumiendo riego por aspersión.

$$28bloques \times \frac{0.9L}{bloque} = 25.2Litros$$

A.2. Energía

Es el consumo eléctrico del sistema de presurización para los aspersores de riego. Una bomba pequeña de 0.5 HP (0.37 kW) se activa en periodos muy cortos 1 minuto cada 4 horas durante el día. Sumando los pequeños periodos de riego durante una semana, se obtienen aproximadamente 0.8 horas de funcionamiento de la bomba por cada metro cuadrado de bloques.

$$0.37kW \times 0.8h \cong 0.3kWh$$

B. Salida.

B.1. Humedad evaporada

Se obtiene restando el agua que se queda "atrapada" en el bloque (hidratación) del total de agua que se usa para regar. El cemento necesita aproximadamente el 25% de su peso en agua para reaccionar químicamente.

$$25.1Litros - (25.1Litros \times 0.25) = 18.83Litros$$

B.2. Gases expulsados

Al no haber combustión ni fuego, estos gases son emisiones indirectas producidas por la planta eléctrica que generó los 0.3 kWh que se usan para bombear el agua.

B.2.1. Trazas de CO_2

Usando el factor de la red eléctrica colombiana $\frac{0.126Kg}{kWh}$

$$0.3kWh \times \frac{0.126Kg}{kWh} = 0.037Kg$$

B.2.2. Trazas de metano

El factor de CH_4 para la red eléctrica es aproximadamente 0.006 gramos de CH_4 por cada kWh consumido.

$$0.3kWh \times \frac{0.006gr}{kWh} = 0.0018gr$$

B.3. Residuo (plástico)

Este residuo sale del proceso una vez que los bloques han terminado su curado de 28 días. Es el área de polietileno necesaria para cubrir la estiba de los 28 bloques y evitar que el viento se lleve la humedad.

Para que el bloque de suelo-cemento gane resistencia, no debe secarse al sol, sino mantenerse húmedo. Por eso se envuelven en plástico (polietileno) para crear una “cámara de vapor”. Estos bloques se apilan en una estiba o torre pequeña para que ocupen menos espacio y sean fáciles de tapar. Se forma una torre de 4 bloques de base por 7 bloques de altura, entonces:

$$\text{Área base} = 0.6m \times 0.3m$$

$$\text{Área base} = 0.18m^2$$

$$\text{Altura de la torre} = 0.1m \times 7$$

$$\text{Altura de la torre} = 0.70m$$

Para envolver esta torre por arriba y por los lados dejando la base en el suelo, se calcula el área del plástico:

$$\text{Total del plástico} = \text{área techo} + \text{área laterales}$$

$$\text{Total del plástico} = 0.18m^2 + (1.8m \times 0.7m)$$

$$\text{Total del plástico} \cong 1.5m^2$$

4. Construcción

Para calcular los datos de la etapa, se debe cuantificar los materiales que realmente se manipulan en la obra y las mermas que se convierten en residuos.

Preparación de mezcla

A. Salidas

A.1. Agua

Para los 50.4 Kg de mezcla que se calcularon en el Anexo A, se usa la relación agua/cemento estándar establecidos en la norma NSR-10 (relación 1:4); el cemento representa aproximadamente el 19% del peso total de los materiales secos.

$$Cemento = 50.4Kg \times 0.19$$

$$Cemento = 9.6Kg$$

Para que el mortero sea trabajable, pero mantenga su resistencia, se utiliza una relación A/C de 0.8 para morteros de pega (es más alta que en el concreto porque la arena y el ladrillo absorben agua).

$$Litros\ de\ agua = Peso\ del\ cemento \times Relación\ \frac{A}{C}$$

$$Litros\ de\ agua = 7.7Litros$$

A.2. Desperdicio de mezcla (mortero)

En la construcción, se estima una pérdida del 5% al 10% de la mezcla por caída al suelo o endurecimiento en el recipiente. Se usa un 7% de perdida para los cálculos. Entonces,

$$Residuo\ mortero\ fresco = 50.4Kg \times 0.07$$

$$Residuo\ mortero\ fresco = 3.53Kg$$

Levantamiento de muro**A. Salidas****A.1. Material particulado**

Este polvo se genera principalmente al cortar los bloques para ajustar las dimensiones en las esquinas o remates del muro. Para corte de materiales pétreos macizos con disco, se estima una emisión de 0.5 gr por cada kg de material procesado/cortado. Se asume que se requiere ajustar o cortar aproximadamente el 10% del total de los ladrillos.

$$239.43Kg \times 0.10 = 23.94Kg$$

$$Material\ particulado = 23.94Kg \times \frac{5gr}{Kg}$$

$$Material\ particulado = 120gr$$

A.2. Residuos (ladrillo roto)

Durante el transporte interno y el ajuste de medidas (cortes para esquinas), se estima una rotura del 3%, entonces,

$$239.43Kg \times 0.03 = 7.2Kg$$

5. Uso CO_2 atmosférico

Este valor se obtiene mediante un proceso llamado Carbonatación. Al igual que el concreto, el bloque de suelo-cemento reacciona con el aire a lo largo de las décadas. El muro tiene 36.4 kg de cemento (bloques + mortero). El cemento tiene cal (CaO) que quiere volver a ser piedra caliza absorbiendo CO_2 del aire. Se estima que, en 70 años, un muro de suelo-cemento puede reabsorber aproximadamente el 20% al 25% del CO_2 que se emitió durante su fabricación química, tomando un promedio de 23%.

$$10.9Kg \times 0.23 = 2.5Kg$$

Sedimento de polvo

Este valor representa el material fino que el muro desprende por erosión natural o desgaste superficial durante su vida útil. El sedimento de polvo en un muro de suelo-cemento de 1 m² sin pañete durante 70 años, se debe considerar una tasa de erosión física mayor, ya que el material está expuesto directamente al roce, al viento y a la abrasión ambiental.

Se utiliza un valor de 0.0214 gramos por m² al año. Esta cifra es ligeramente superior a la de un muro acabado, debido a la degradación lenta de la matriz de cemento superficial por contacto directo con el aire.

$$Sedimento\ total = Tasa\ de\ desgaste \times Vida\ útil$$

$$Sedimento\ total = \frac{0.0214g}{año} \times 70años$$

$$\text{Sedimento total} = 1.5gr$$

6. Fin de vida

Para calcular esta etapa, se debe proyectar qué sucede con el muro después de su vida útil 70 años aproximadamente conforme a la normativa se utiliza lo establecido en la Resolución 620 del 2008 emitida por el IGAC, la cual ha definido: “Artículo 2° - Parágrafo Para inmuebles cuyo sistema constructivo sea muros de carga, la vida útil será de 70 años. Los cálculos se basan en la Ley de Conservación de la Masa y en indicadores de eficiencia de maquinaria de demolición.

Para el Fin de Vida, se calculó una salida de 290 kg de residuos pétreos (RCD), manteniendo la integridad de la masa inicial del muro.

6.1 Energía mecánica

Para derribar un muro macizo de $1m^2$ se requiere el uso de herramientas eléctricas (rotomartillo) o maquinaria pesada (retroexcavadora con martillo). Para este proyecto se estima demolición con rotomartillo, lo que estima un consumo de 0.5kWh de energía eléctrica.

Si se usa esta herramienta de 1500W durante 20 minutos para demoler el muro de $1m^2$, entonces:

$$\text{Energía} = 1.5kW \times 0.33h$$

$$\text{Energía} = 0.5kWh$$

6.2 Emisión de material particulado (PM_{10})

La demolición es una de las etapas que más polvo genera. Según la EPA el factor de emisión de material particulado es de aproximadamente 0.00085Kg por cada Kg de material demolido.

$$PM_{10} = 290Kg \times 0.00085$$

$$PM_{10} = 247gr$$

Apéndice C. Matriz CONESA

