

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**EVALUACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y USO DE
RECURSOS DURANTE LAS FASES DE EXTRACCIÓN Y
PRODUCCIÓN DE TRES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
(LADRILLO, CONCRETO Y BLOQUE) PRODUCIDOS EN EL
ECUADOR**

**EVALUACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO, Y USO DE
RECURSOS EN LA FASE DE PRODUCCIÓN DEL LADRILLO
SEMI-MECANIZADO PRODUCIDO EN EL ECUADOR**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

SERGIO ANDRÉS TORRES REYES
sergio.torres@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. SANTIADO DAVIDA VACA JIMÉNEZ, MSc, PhD.
santiago.vaca@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2021

CERTIFICACIONES

Yo, SERGIO TORRES declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



SERGIO ANDRÉS TORRES REYES

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por SERGIO TORRES, bajo mi supervisión.



Firmado electrónicamente por:

**SANTIAGO
DAVID VACA
JIMENEZ**

Ing. SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ, MSc, PhD.

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

SERGIO TORRES

Ing. SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ, MSc, PhD.

DEDICATORIA

El presente trabajo es dedicado a todas aquellas personas que han aportado con un granito de arena en mi crecimiento personal y profesional. Esta es la culminación de un conjunto de consejos, experiencias, aprendizajes y anécdotas.

Sergio Andrés Torres Reyes

AGRADECIMIENTO

A mis padres Luis y Leonela, por inspirarme a ser mejor persona inculcándome buenos valores y siempre brindarme con su incondicional amor y apoyo

A mi hermano Jonathan, por cuidarme, apoyarme y escucharme. Gracias por ser como un padre para mí y enseñarme con el ejemplo.

A mis abuelitos, tíos y primos, por brindarme una mano en cualquier situación. La unión que nos caracteriza me llena el corazón. En especial, agradecer a mi prima Melanie por ser como una hermana, escucharme en los buenos y malos momentos, apoyarme, recriminarme y aconsejarme.

A mis amigos, por compartir conmigo esta etapa de mi vida y llenarme de alegrías y enseñanzas. En especial, agradecer a Danilo y su familia por abrirme las puertas de su hogar en diversas situaciones y amparar mi bienestar estudiantil.

A mi mascota Yura, por su compañía, afecto y locuras que me llenan el corazón. Gracias por ser parte de nuestra familia

A mi director Santiago Vaca, por su guía, comprensión y apoyo dentro del desarrollo de este trabajo, sin su dedicación, este trabajo no hubiera sido posible.

A mis profesores, por sus enseñanzas, historias y consejos. En especial, agradecer a Rafael Soria, por ser un ejemplo como persona, profesor y profesional.

A la Escuela Politécnica Nacional, por abrirme sus puertas y acogerme en sus instalaciones. Gracias por ser mi segunda casa, aquí compartí, aprendí, sufrí y disfruté. Aquí viví.

Sergio Andrés Torres Reyes

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	1
1.3 Alcance	1
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Generalidades de ladrillo.....	2
1.4.2 Manufactura de ladrillo	3
1.4.3 Producción de ladrillos en el Ecuador.....	4
1.4.4 Tipos de hornos para la producción de ladrillo.....	5
1.4.5 Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	7
1.4.6 Huella de carbono	8
2 METODOLOGÍA.....	9
2.1 Definición de alcance del estudio.....	10
2.1.1 Límites del sistema.....	10
2.1.2 Unidad funcional.....	11
2.2 Caso de estudio	11
2.2.1 Dosificación y mezclado de materia prima	13
2.2.2 Extrusión de ladrillos macizos.....	14
2.2.3 Secado y Quema del Ladrillo	15
2.2.4 Disposición y Almacenaje	16
2.2.5 Emisiones generadas.....	17

2.2.6	Emisiones de CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	18
2.2.7	Emisiones varias	18
2.3	Emisiones totales del sistema	19
2.4	Consumo energético y uso de agua.....	20
2.4.1	Energía total durante la manufactura del ladrillo	20
2.4.2	Uso de agua durante la manufactura del ladrillo	20
2.5	Evaluación de impacto ambiental.....	20
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	21
3.1	Resultados	21
3.1.1	Inventario de Flujos de Entrada y Salida	21
3.1.2	Emisiones totales de la producción de ladrillo	24
3.1.3	Consumo energético total	24
3.1.4	Consumo de agua	25
3.1.5	Huella de carbono (openLCA).....	25
3.2	Discusión.....	25
3.3	Conclusiones.....	28
3.4	Recomendaciones	29
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
5	ANEXOS.....	33
5.1	Flujos inventariados ingresados al programa openLCA.....	33
5.2	Categorías de impacto ambiental (Resultado openLCA)	33

RESUMEN

El ladrillo es un material importante del sector de la construcción debido a sus excelentes propiedades térmicas y mecánicas. Además, la producción de ladrillo en el Ecuador es una de las actividades económicas más importantes del país. Sin embargo, su producción requiere de muchos recursos naturales y energéticos, que son escasos, y que generan impactos ambientales. A pesar de esto, en el país no se han realizado estudios respecto al consumo de energía, uso de recursos e impacto ambiental. El presente estudio se enfocó en la estimación de la cantidad de energía, uso de recursos y huella de carbono en el caso específico de un productor de ladrillo semi-mecanizado, realizando un análisis de ciclo de vida (ACV) de puerta a puerta basado en la norma ISO 14040, con la ayuda del programa openLCA para evaluar el impacto ambiental (huella de carbono). El consumo energético y las emisiones contaminantes se encuentran representados principalmente por el proceso de quema del ladrillo, teniendo un consumo de energía de 3,79 [MJ/kg_{ladrillo}] y emisiones de CO₂ de 0,429 [kg_{CO2eq}/kg_{ladrillo}]. El agua es consumida netamente para el mezclado de la arcilla, utilizando 0,277 [l/kg_{ladrillo}].

Palabras clave: Ladrillo, Análisis de Ciclo de Vida, Energía Térmica, Huella de carbono, Ecuador

ABSTRACT

Clay bricks are important materials in the construction sector attributable to its excellent thermal and mechanical properties. In Ecuador, the production of clay bricks is one of the most important and oldest activities in the country. Nevertheless, its production involves the use of non-renewable resources and energy. Hence, the production of clay brick has a large footprint and its own environmental concerns. Therefore, this study is focused on quantifying the amount of energy, resource use and carbon footprint in a specific case of a semi-mechanized brick producer, performing a gate-to-gate Life Cycle Assessment (LCA) based on the ISO 14040 standard, with the help of the openLCA program to assess the environmental impact (carbon footprint). Energy consumption and polluting emissions are mainly represented by the brick burning process, with an energy consumption of 3,79 [MJ/kg_{brick}] and CO₂ emissions of 0,429 [kg_{CO2eq}/kg_{brick}]. The water is only consumed for mixing the clay, requiring 0,277 [l/kg_{brick}].

Keywords: Clay brick, Life Cycle Assessment, Thermal Energy, Carbon Footprint, Ecuador

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Como resultado del aumento de los costos y el consumo de energía, así como las emisiones de carbono en el sector de la construcción, los diseñadores se han encaminado a desarrollar edificaciones energéticamente eficientes. Del mismo modo, los proveedores de materiales están buscando formas de mejorar la eficiencia energética en la producción de sus materiales (Guo et al., 2019)

En el Ecuador, el ladrillo es uno de los materiales más utilizados dentro de la construcción, esto debido a sus buenas características estructurales, estéticas y aislantes (Alvear & Palomeque, 2017). Es importante realizar un Análisis de Ciclo de Vida del ladrillo debido a que es un material elaborado por empresas y también por artesanos. El conocimiento de su impacto ambiental no se encuentra definido y evaluado con estudios de otros materiales o incluso del mismo material manufacturado de diferente forma.

Por ello, el presente trabajo ha sido planteado con el fin de cuantificar el consumo energético y evaluar las huellas de carbono, energía e hídrica del ladrillo semi-mecanizado en su fase de producción. El enfoque, como se mencionó, es en el proceso de producción, lo que significa un Análisis de Ciclo de Vida del ladrillo de “puerta a puerta”, desde la entrada de la materia prima a la fábrica, hasta la salida del ladrillo. La metodología utilizada será la estipulada en la norma ISO 14040 (2006a).

1.1 Objetivo general

Evaluar el consumo energético y de recursos durante la fase de producción de ladrillos semi-mecanizados producidos en el Ecuador

1.2 Objetivos específicos

- Definir la unidad funcional y los límites del ciclo de vida de la producción de ladrillos semi-mecanizados
- Inventariar los flujos energéticos, flujos elementales y emisiones de carbono en la cadena de valor
- Estimar el consumo de energía, cantidad de emisiones y uso de recursos a través de categorías de impacto
- Comparar y poner en contexto la energía embebida cuantificada de los ladrillos dentro de los límites de ciclo de vida establecidos

1.3 Alcance

El presente proyecto se basará en la norma NTE INEN ISO 14040 (2006a), la cual establece los principios y marco de referencia para la elaboración del Análisis de Ciclo de Vida (LCA) de un producto o servicio. Este análisis consta de 4 fases: definición de objetivo y alcance, posteriormente, el análisis de inventario, seguido de ello se realiza el cálculo de indicadores de impacto (huella energética, huella de carbono y huella de agua) y, finalmente, se realiza una interpretación de resultados comparando los mismos con diferentes estudios.

En la primera fase, se determinará la unidad funcional y las unidades de proceso que serán bases para el estudio. En la segunda fase se establecerá cuantitativamente cada una de las entradas y salidas del proceso. Para cumplir con este objetivo los valores antes mencionados serán tomados in situ, de base de datos y, de investigaciones que estudien la producción del ladrillo semi-mecanizado en Ecuador.

Para la tercera fase, se utilizará la metodología de la IPCC (2006) y la EMEP/EEA (2019) para determinar diferentes emisiones. La huella de carbono se encontrará con el software libre openLCA. Los consumos de energía y agua se obtendrán del inventario en los subprocesos que involucran la producción del ladrillo y uso de flujos elementales. Finalmente, en la interpretación de resultados se realiza una comparación con otros estudios, mencionando implicaciones y limitaciones del estudio.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Generalidades de ladrillo

El sector de la construcción se ha convertido en un consumidor representativo de energía, agua y materia prima, siendo así que ocupa entre el 30 y 40% de la energía a nivel mundial y 1/3 de las emisiones de CO₂ emitidas a la atmósfera. Este alto nivel de emisiones de CO₂ se debe al uso de combustibles fósiles en los procesos de extracción de materia prima, producción y transporte (Dabaieh et al., 2020). Es importante establecer tecnologías y materiales que permitan mejorar estos procesos haciéndolos más amigables con el ambiente.

El ladrillo es uno de los materiales de construcción más utilizados por sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Son resistentes y duraderos gracias a la composición mineral de la arcilla, resisten esfuerzos a compresión y tracción y soportan condiciones climáticas adversas. A pesar de sus beneficios, su producción implica el uso de materia prima no renovable y consumo de grandes cantidades de energía que provocan emisiones de gases de efecto invernadero (Ramos Huarachi et al., 2020). Por ejemplo, en India, se

consume alrededor de 35 millones de toneladas de carbón al año para la quema del ladrillo (Kumbhar et al., 2014)

1.4.2 Manufactura de ladrillo

La norma NTE INEN 293 (2014) establece que el ladrillo es una pieza en forma de prisma regular de arcilla moldeada que se utiliza en albañilería. Según la norma NTE INEN 297 (1977), los ladrillos pueden ser producidos de dos formas: macizos o huecos. La principal diferencia es que los primeros no poseen perforaciones en su interior y los segundos sí. Los ladrillos, generalmente, se deben construir modularmente, como lo define la norma NTE INEN 317 (2014). Las configuraciones modulares provistas por esta norma se aprecian en la Tabla 1.1. Para entenderlas mejor, se toma como ejemplo la primera modulación, la cual indica que la profundidad y ancho tendrían las mismas medidas (1 M), mientras que el largo sería el doble de estas dos medidas (2 M), por ejemplo, un ladrillo tendría medidas de 200x100x100 [cm].

Tabla 1.1. Dimensiones modulares normales de los ladrillos cerámicos

	Largo	Ancho	Profundidad
1:	2 M	1 M	1 M
2:	3 M	1,5 M	1 M
3:	4 M	2 M	1 M
4:	5 M	2,5 M	1 M

Fuente: NTE INEN 317 (2014)

La elección de la configuración modular para la fabricación del ladrillo es decisión de cada productor, lo cual provoca que existan variedad en las dimensiones, mientras cumplan con la modulación establecida por la norma. Además, la norma estipula que se pueden fabricar ladrillos con otro tipo de modulación cuando exista un convenio entre productores y compradores.

La manufactura del ladrillo se realiza primero con la obtención de materia prima, seguido por un proceso de batido de la arcilla, en el cual se mezcla con agua, para obtener una mezcla que será moldeada a la forma de ladrillo que vende de cada productor. Posteriormente, se realiza el secado para reducir la humedad y evitar fisuras cuando se realiza el proceso final, la quema (Alvear & Palomeque, 2017). El proceso de producción de ladrillo se observa en la Figura 1.1.

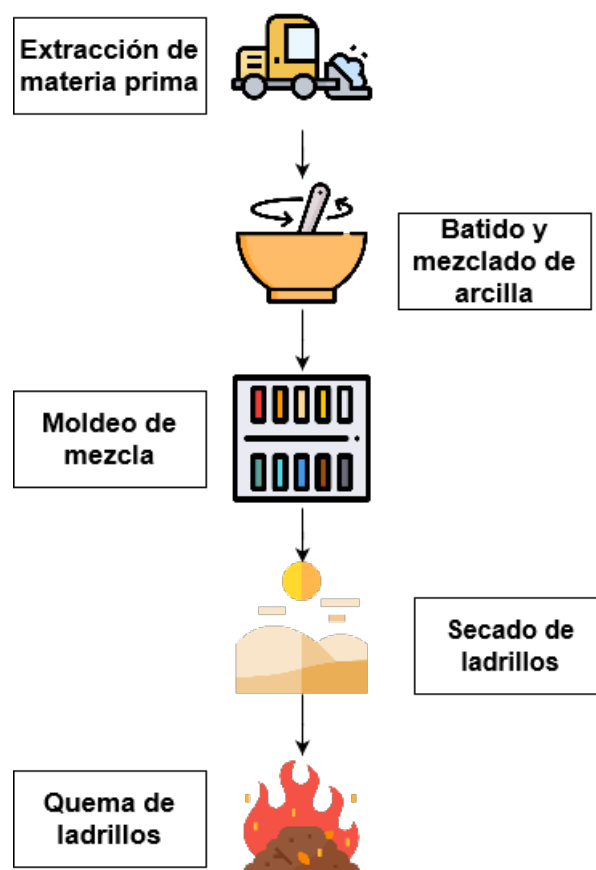


Figura 1.1. Proceso de producción de ladrillos
Fuente: Propia

La forma de realizar estos procesos es diferente, según la tecnología de los productores, se tiene ladrilleras artesanales, semi-mecanizadas o mecanizadas. Las ladrilleras artesanales utilizan ganado vacuno o caballo para realizar la mezcla y el batido. A la mezcla se le da forma mediante moldes de madera y la quema se realiza en hornos tradicionales. Las ladrilleras semi-mecanizadas utilizan maquinaria para facilitar el trabajo, el proceso de mezcla lo realizan con mezcladoras y el moldeo se da mediante extrusoras, pero la producción no es continua debido al uso de hornos tradicionales. Las ladrilleras mecanizadas, además de utilizar mezcladoras y extrusoras, tienen un proceso continuo y automatizado por el uso de hornos más modernos (Maza, 2011).

1.4.3 Producción de ladrillos en el Ecuador

El INEC (2017) establece que el sector de la construcción aportó con un Producto Interno Bruto (PIB) de 10,2% a Ecuador. La producción de ladrillo es una de las actividades económicas más importantes para el sector de la construcción en el Ecuador, siendo así que de los aproximadamente 15000 establecimientos de este sector, existen 3800 empresas que tienen relación con la producción de ladrillo (E. Tenesaca, 2019), de las

cuales 1734 son productores de ladrillo. Entre las provincias con mayor cantidad de empresas productoras de ladrillo se tiene a Azuay (17%), Manabí (16%), Pichincha (12%), Cotopaxi (10%), Chimborazo (8%) y Guayas (8%) (M. Tenesaca & Rasco, 2017), siendo así que en Azuay se produce alrededor de 52,02 millares de ladrillos anualmente por cada empresa (E. Tenesaca, 2019).

El principal problema de esta industria es que no se controla debidamente la producción de ladrillos, a pesar de existir algunas regulaciones, provocando problemas ambientales, sociales y productivos (Maza, 2011). Es importante resaltar los problemas ambientales ya que la manufactura de ladrillo contribuye en gran medida a la degradación ambiental, en el proceso de quema. Un horno de quema de ladrillo emite al aire alrededor de 70 a 282 [g] de dióxido de carbono, entre 0,29 y 5,78 [g] de monóxido de carbono y de 0,15 a 1,56 [g] de material particulado por cada kilogramo de ladrillo cocido (Murmu & Patel, 2018)

1.4.4 Tipos de hornos para la producción de ladrillo

El proceso de quema puede ser llevado a cabo en diferentes tipos de hornos que se clasifican según la continuidad del proceso de quema. Los tres tipos de horno son: intermitentes, de fabricación semicontinua de ladrillos y de fabricación continua de ladrillos. Los hornos intermitentes son utilizados por ladrilleras artesanales y semi-mecanizadas, los hornos de fabricación semicontinua son utilizados por ladrilleras semi-mecanizadas y mecanizadas, y los hornos de fabricación continua son solamente por ladrilleras mecanizadas debido al requerimiento de automatización del proceso (Fontalvo & Gutiérrez, 2014).

1.4.4.1 Hornos intermitentes

Se componen, principalmente, de una cámara en la cual se colocan los ladrillos, en la parte inferior se tiene la cámara de combustión donde se introducirá el combustible. Los hornos intermitentes pueden ser hornos de campaña o volcán (Figura 1.2), horno de llama horizontal u hornos redondos (Barranzuela, 2014). El problema de estos hornos es la deficiencia en altura de las chimeneas o que simplemente no poseen una lo que provoca una pérdida en la eficiencia de combustión y una alta generación de emisiones (Fontalvo & Gutiérrez, 2014).



Figura 1.2. Horno Intermitente con suelo y muros laterales.
Fuente: Barranzuela (2014)

1.4.4.2 Hornos de fabricación semicontinua de ladrillos

Figura 1.3) y hornos tipo anillo. La combustión en el horno de túnel utiliza el calor residual del encendido de la primera cámara y al finalizar la quema en esta, se procede a encender la siguiente. La construcción de este tipo de hornos es costosa, por ello deben ser construidos considerando si los procesos anteriores a la quema van a abastecer la cantidad de ladrillos que se puede quemar con este tipo de hornos (Fontalvo & Gutiérrez, 2014).

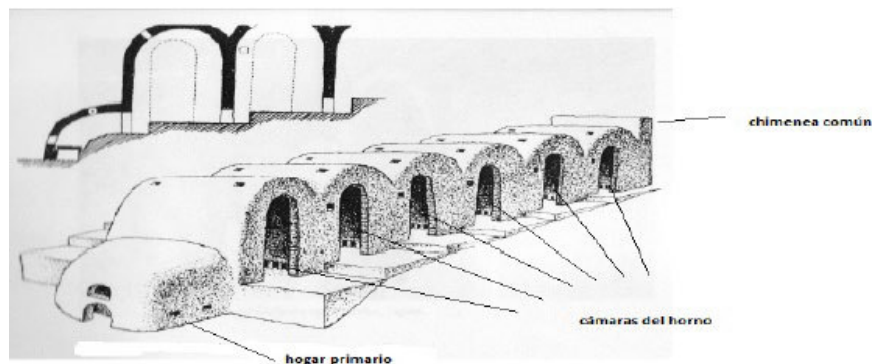


Figura 1.3. Horno semicontinuo para la producción de ladrillos
Fuente: Fontalvo & Gutiérrez (2014)

1.4.4.3 Hornos para fabricación continua de ladrillos

Como su nombre lo dice, son hornos que se pueden operar continuamente, por eso son apropiados para altas producciones, de hasta 200000 [ladrillos/día]. El principio de funcionamiento de estos hornos se basa en hacer que los ladrillos ingresan a un túnel moviéndose continuamente en las diferentes secciones: precalentamiento, quemado y enfriamiento (Fontalvo & Gutiérrez, 2014). Estos hornos aprovechan el calor obtenido en la combustión para el precalentamiento, permitiendo obtener una alta eficiencia térmica (Barranzuela, 2014). El horno tipo Hoffman (Figura 1.4) es el horno de fabricación continua

más conocido y utilizado. Este tipo de horno quema los ladrillos mediante la alimentación de combustible en el techo para que estos tengan un contacto bastante cercano con el combustible ardiente (Figuroa & Martínez, 2000). Estos hornos son costosos de fabricar, mucho más costosos que los hornos para fabricación semicontinua, porque necesitan de un sistema de automatización para su correcto funcionamiento (Fontalvo & Gutiérrez, 2014).

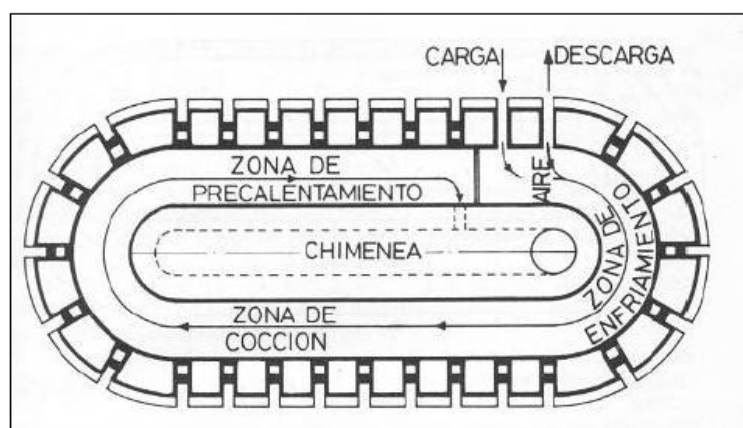


Figura 1.4. Horno de Fuego Continuo tipo Hoffman
Fuente: Barranzuela (2014)

1.4.5 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

La norma ISO 14044 (2006b) establece que el análisis de ciclo de vida (ACV) es una técnica que permite tratar los impactos ambientales generados de productos y servicios. El ACV puede contribuir a identificar cambios en las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto o servicio de modo que permitan reducir el impacto ambiental, también, podría aportar información respecto a la toma de decisiones en las industrias. El ACV podría dar asistencia al marketing, por ejemplo, en caso de que se quiere implementar etiquetado ambiental.

El alcance del ACV a realizar depende de la profundidad del estudio que se desee realizar. El estudio de Cao (2017) menciona los diferentes alcances que puede tener un ACV:

- “De la cuna a la tumba”. Cuando el ACV se realiza desde la extracción de recursos, pasando por la fase de uso hasta la fase de “destrucción”.
- “De la cuna a la puerta”. Cuando el ACV se realiza desde la extracción de recursos hasta una fase en la que el producto se encuentra realizado, pero no se distribuye
- “De la cuna a la cuna”. Es un tipo de ACV “de la cuna a la tumba” en la cual al final del ciclo de vida, el producto se recicla.
- “De puerta a puerta”. Es un ACV que se realiza con enfoque en los procesos de valor agregado dentro de la cadena de producción

1.4.6 Huella de carbono

La huella de carbono se define como la cantidad de CO₂ equivalente emitido a la atmósfera por los diversos gases de efecto invernadero (GEI) durante el ciclo de vida de un proceso, servicio, individuo, organización o evento (MacDonald & Reitmeier, 2017). El CO₂ equivalente es un valor que considera en su resultado a los GEI: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), entre otros (Chapagain & James, 2013).

2 METODOLOGÍA

La norma ISO 14044 (2006b) indica que las fases de estudio en un ACV son la definición de objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto ambiental e interpretación. La norma ISO 14040 (2006a) detalla que la primera fase establece el alcance del ACV, límites del sistema y nivel de detalle según el tema y el uso previsto del estudio. La segunda fase consiste en inventariar el ciclo de vida, obtener los datos de entrada y salida bajo una referencia en el sistema de estudio. La tercera fase proporciona información para evaluar ambientalmente los resultados del inventario de ciclo de vida. Finalmente, en el cuarto paso se discuten los resultados del inventario y de la evaluación ambiental.

Para realizar el tercer paso en un ACV es necesario el uso de programas, metodologías y bases de datos que permiten estimar el impacto ambiental. El programa más utilizado es el software pagado SimaPro, sin embargo, el uso de software libre, como openLCA, ha ganado popularidad en personas que realizan ACV (Ramos Huarachi et al., 2020) debido a que mediante la herramienta openLCA Nexus se tiene acceso a gran cantidad bases de datos gratis y pagadas.

El uso de base de datos es restringido por ser de acceso libre o pagado, teniendo así que una de las bases de datos más utilizada, Ecoinvent no es de acceso libre (Lesage & Samson, 2016), en contraparte, se tiene la base de datos European reference Life Cycle Database (ELCD), la cual es considerada la mejor base de datos gratuita por el hecho de que permite obtener datos de varias bases (Martínez-Rocamora et al., 2016). Las metodologías más utilizadas son ReCiPe y CML 2001, siendo ReCiPe la más popular porque permite calcular indicadores para puntos medios y finales (Bare & Gloria, 2006).

La Figura 2.1 muestra la metodología aplicada para encontrar el consumo de energía, cantidad de emisiones y uso de agua en el proceso de fabricación del ladrillo. Esta metodología utiliza 6 pasos consecutivos. La norma ISO 14040 (2006a) establece 4 fases para realizar un estudio de ACV, relacionando estas 4 fases con los 6 pasos de la metodología se tiene que: el paso 1 permite establecer el alcance, objetivo y límites del ACV (fase 1); el paso 2, 3, 4 y 5 permiten inventariar los flujos de entrada y salida (fase 2) y; el paso 6, corresponde a la evaluación de impacto ambiental mediante los indicadores de impacto ambiental (fase 3). La fase 4 corresponde a la interpretación de resultados, la cual se realiza en una sección posterior.

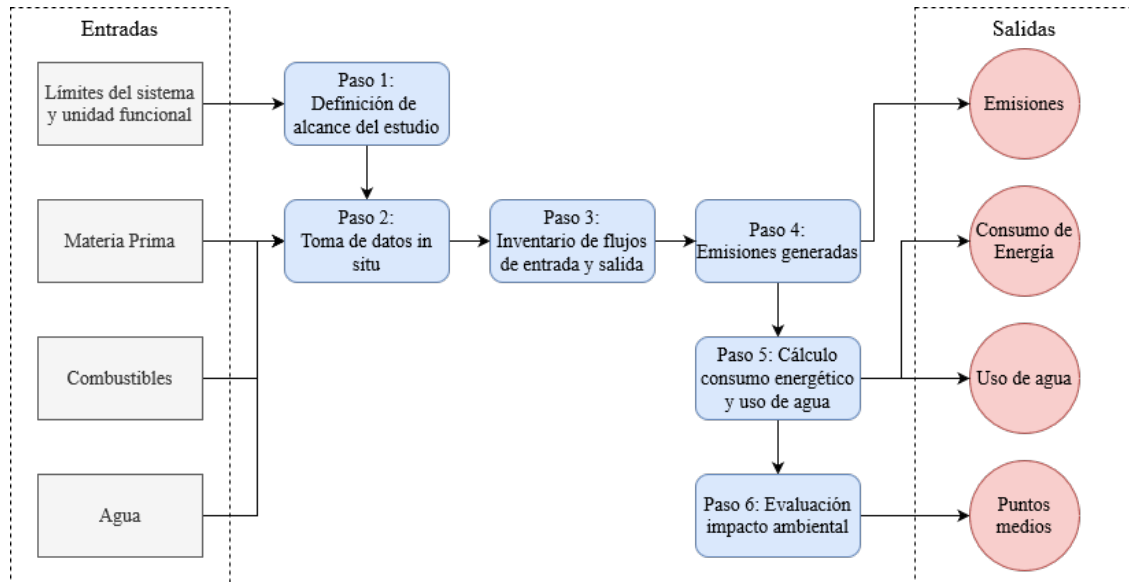


Figura 2.1. Metodología aplicada en el estudio
Fuente: Propia

2.1 Definición de alcance del estudio

La norma ISO 14044 (2006b) establece que se debe definir claramente las funciones del sistema, para lo cual se fija una unidad funcional que sea acorde al objetivo y alcance del estudio de modo que, las entradas y salidas se encuentren unificadas bajo una misma unidad. La norma ISO 14040 (2006a) dictamina que los límites del sistema se fijan según el objetivo y alcance, los mismos delimitan los procesos unitarios dentro del ACV.

2.1.1 Límites del sistema

El ACV se realizará a los ladrillos semi-mecanizados macizos debido al incremento de uso de maquinaria en el sector ladrillero (Maza, 2011). El estudio se limita al proceso de manufactura, lo que significa, de puerta a puerta, desde la dosificación y mezclado de los materiales, hasta la disposición y almacenaje del ladrillo. En la Figura 2.2 se observan los diferentes límites dentro del ciclo de vida del ladrillo detallando los subprocesos en la manufactura.

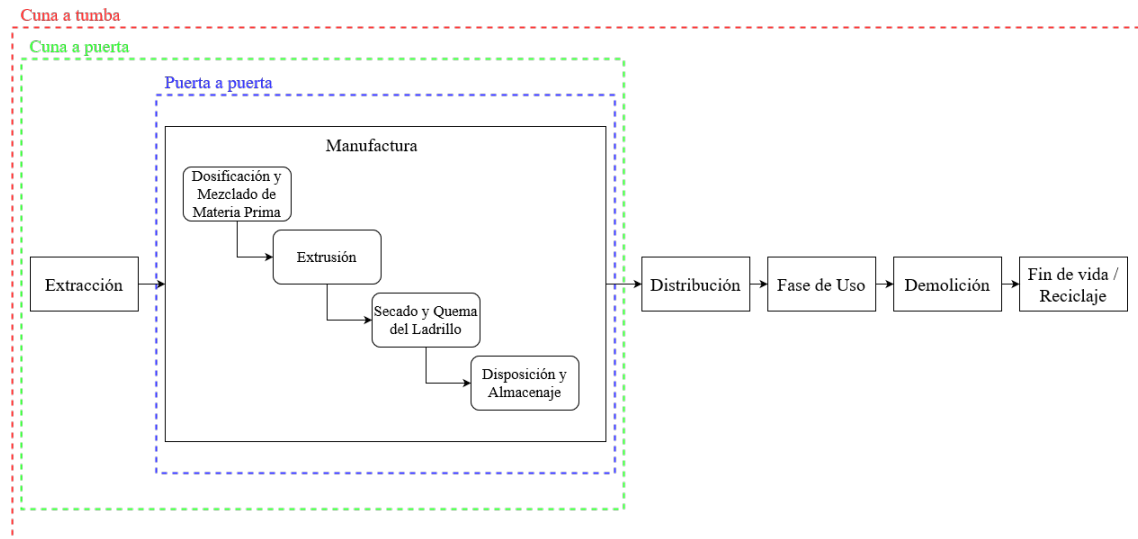


Figura 2.2. Límites del ACV del ladrillo semi-mecanizado
Fuente: Propia

2.1.2 Unidad funcional

La unidad funcional seleccionada es de 1 [kg] de ladrillo. Este valor es determinado debido a que se aplica en varios estudios (Alvear & Palomeque, 2017; Christoforou et al., 2016; Venegas, 2018) y, los ladrillos semi-mecanizados pueden tener medidas según la configuración modular, lo cual limita el uso de una unidad funcional por unidad de ladrillo ya que se debería realizar una comparativa con un ladrillo de la misma dimensión.

2.2 Caso de estudio

La producción de ladrillo semi-mecanizado varía según el productor debido a que cada uno trabaja de forma independiente, manejan diferentes capacidades, número de personal y, equipos (Maza, 2011; M. Tenesaca & Rasco, 2017). En este trabajo, se tomará como caso de estudio al productor Jorge Chapuel, dueño de su propio negocio ubicado en el sector de Conocoto.

Este estudio se centra en la fabricación del ladrillo semi-mecanizado macizo, con los datos en una quema completa. Una quema es considerada como un ciclo de producción de ladrillos. Para este caso de estudio, el señor Chapuel tiene aproximadamente 9 ciclos de producción (9 quemas) en un año. El proceso de manufactura del señor Chapuel, con los diferentes flujos elementales, se detalla en la Figura 2.3.

La Tabla 2.1 indica los datos de todo el proceso, y de cada subproceso proporcionados por el señor Chapuel para una quema. La cantidad de la mezcla purificada se estima considerando que las pérdidas aproximadas respecto a la arcilla bruta según el señor Chapuel son del 10%.

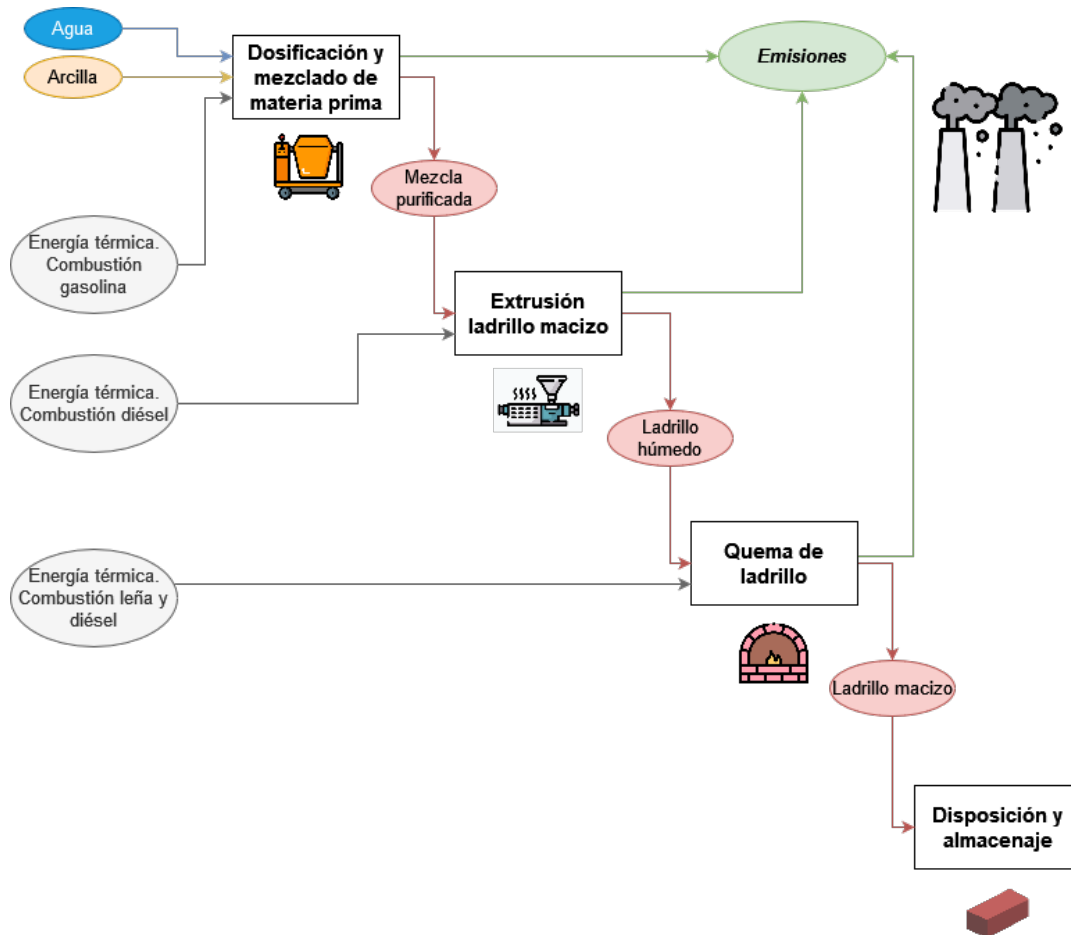


Figura 2.3. Proceso de producción de ladrillo para el caso de estudio

Fuente: Propia

Tabla 2.1. Flujos del proceso de producción de ladrillo del caso estudiado

Proceso	Detalle	Cantidad	Unidad
<i>Global</i>	Ladrillos producidos	18000	u
	Masa de una unidad de ladrillo macizo	3,8	kg
<i>Dosificación y mezclado de materia prima</i>	Agua	1000	canecas
	Arcilla	13	volquetas
	Gasolina	6	galones
<i>Extrusión de ladrillo macizo</i>	Mezcla purificada	11,7	volquetas de 7 m ³
	Diésel	2	canecas
<i>Quema de ladrillo</i>	Leña	28	m ³
	Diésel	1	galón

Fuente: Propia

Para conocer la cantidad de agua, arcilla y diésel es necesario conocer la capacidad del recipiente: en el caso de la caneca, se hace referencia a una con volumen de 20 litros. El volumen de la volqueta utilizada es de 7 [m³]. Además, todos los datos se deben trabajar

bajo un único sistema de unidades, para este caso de estudio, se trabaja con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Para referenciar las entradas y salidas de los diferentes procesos respecto a la unidad funcional, se debe aplicar la Ecuación 2.1.

$$x_{kg \text{ ladrillo}} = \frac{x_{cantidad}}{Lad_{quemada} * m_{ladrillo}}$$

Ecuación 2.1. Flujos respecto a unidad funcional

Donde $x_{kg \text{ ladrillo}}$ corresponde al valor de la entrada según corresponda en función de la unidad funcional o kg de ladrillo $\left[\frac{unidad}{kg \text{ ladrillo}}\right]$, $x_{cantidad}$ es el valor de la entrada por quema, $Lad_{quemada}$ es el valor de ladrillos por quema, en este caso igual a 18000 y, $m_{ladrillo}$ es la masa de una unidad de ladrillo igual a 3,8 kg, valores en la Tabla 2.1.

2.2.1 Dosificación y mezclado de materia prima

Arcilla y agua son suministrados a una mezcladora (Figura 2.4) que se encarga de triturar la arcilla y purificar la mezcla para que sea homogeneizada. La mezcladora utiliza un motor marca Briggs & Stratton de 16 HP a gasolina (Figura 2.5).



Figura 2.4. Mezcladora de arcilla y tierra
Fuente: Propia



Figura 2.5. Motor Briggs & Statton de 16HP para funcionamiento de mezcladora.
Fuente: Propia

En este proceso se tiene flujos de entrada a la arcilla, agua y gasolina. La arcilla, el agua y la gasolina deben ser expresadas mediante su flujo másico, para lo cual se tiene que el valor de la densidad de la arcilla es de $2480 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ (Fajardo, 2017), de la gasolina de $735,08 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ (Gallegos, 2005) y del agua de $1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ (Çengel & Boles, 2012). Para calcular la energía térmica del combustible se utiliza la Ecuación 2.2 (Çengel & Boles, 2012)

$$Q_f = m_f * PCI_f$$

Ecuación 2.2. Energía térmica del combustible

Donde m_f es la masa de combustible utilizada [kg], PCI_f es poder calorífico inferior del combustible [TJ/kg] y, Q_f es la energía térmica del combustible [MJ]. En este proceso se utiliza gasolina, con un poder calorífico inferior de $40,09$ [MJ/kg] (Gallegos, 2005).

Los flujos de salida son la mezcla purificada y las emisiones generadas debido a la combustión de gasolina, como se observa en la Figura 2.3. La mezcla purificada es una cantidad que considera un porcentaje de desperdicio. El cálculo de emisiones se detalla posteriormente.

2.2.2 Extrusión de ladrillos macizos

La mezcla purificada pasa a una extrusora que obtiene el ladrillo macizo mediante un dado, la extrusora se puede observar en la Figura 2.6. Este equipo funciona mediante un tractor a diésel.



Fuente: Propia

Flujos de entrada son la mezcla purificada y diésel. El diésel debe ser expresado en flujo másico, considerando una densidad de $832 \frac{kg}{m^3}$ (Bastidas & Bolaños, 2014). La energía térmica se calcula con la Ecuación 2.2, utilizando el poder calorífico del diésel de 43,1 [MJ/kg] (Bastidas & Bolaños, 2014).

Los flujos de salida, como se observa en la Figura 2.3, son los ladrillos húmedos y las emisiones generadas por la combustión de diésel. El cálculo de emisiones se indica posteriormente.

2.2.3 Secado y Quema del Ladrillo

El proceso de secado se lleva a cabo colocando el ladrillo obtenido de la extrusora en el galpón para la remoción natural de humedad, primero en el piso y, posteriormente, pasa a ser colocado uno encima de otro cercano al sol para que pueda finalizar su secado, cómo se observa en la Figura 2.7. El proceso de quema se lleva a cabo en un horno clásico, tipo volcán (Figura 2.8). El horno es alimentado constantemente de leña. Para su encendido se utiliza diésel.



Fuente: Propia



Fuente: Propia

En este proceso se tiene como entradas los ladrillos secos, leña y diésel. La cantidad de leña se debe expresar en flujo másico, para lo cual se tiene una densidad de $582 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ (Miranda & Pereira, 2016), considerando que la principal materia prima en la cocción de ladrillos en este sector es la leña proveniente del eucalipto (*Eucalyptus Globulus*) (García & Pañi, 2013). Para expresar el diésel en flujo másico se utiliza la densidad mencionada en la Sección 2.3.2.

La energía térmica del proceso es la suma de la combustión de leña y diésel, para lo cual se utiliza la Ecuación 2.2 con el poder calorífico de la leña igual a $15,8 \text{ [TJ/kg]}$ (García & Pañi, 2013). El poder calorífico del diésel se menciona en la Sección 2.3.2.

Los flujos de salida, como se observa en la Figura 2.3, son los ladrillos húmedos y las emisiones generadas por la combustión de leña y diésel. El cálculo de emisiones se muestra en una sección posterior.

2.2.4 Disposición y Almacenaje

Los ladrillos cocidos son entregados inmediatamente a los intermediarios o clientes por ser un productor de ladrillo conocido. En caso de ser almacenados, se dejan en el horno hasta su venta. El ladrillo macizo listo para la venta se puede observar en la Figura 2.9. En promedio, las dimensiones son de $260 \times 128 \times 70 \text{ mm}$. En este proceso no existe flujo de entrada ni salida de material, energía o recurso.



Fuente: Propia

2.2.5 Emisiones generadas

Para el cálculo de las diferentes emisiones y contaminantes se utiliza las guías del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (2006) y, la guía de inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos del Programa Europeo de Seguimiento y Evaluación (EMEP) en conjunto con la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) (2019). En estas guías se indican tres niveles para estimar las emisiones, sean estos 1, 2 y 3. La principal diferencia entre estos es la complejidad metodológica, siendo el nivel 3 el más exigente. A medida que el nivel es más complejo se requiere más exigencia en cuestión de requisitos de datos, pero se tiene un cálculo más preciso, siendo el nivel 3 el más preciso.

En este caso de estudio se aplica la metodología nivel 1, debido a que la metodología de IPCC (2006) estipula que para utilizar el enfoque de nivel 2 es necesario conocer factores de emisión específicos de cada país para cada contaminante, datos insuficientes en Ecuador. Igualmente, para la metodología de la EMEP/EEA (2019), los datos obtenidos de este caso de estudio son insuficientes para aplicar el enfoque de nivel 2. El cálculo de emisiones se realiza con la Ecuación 2.3 (IPCC, 2006).

$$Emi_f = Q_f * fe_f$$

Ecuación 2.3. Cálculo general de la cantidad de emisiones contaminantes según el combustible

Donde Emi_f es el valor de emisiones según el tipo de combustible [$Unidad_{contaminante}$], Q_f la energía térmica o cantidad de combustible quemado [MJ] y, fe_f es el factor de emisión de un determinado contaminante por el tipo de combustible [$Unidad_{contaminante}/MJ$], valores que se muestran en la Tabla 2.2, Tabla 2.3 y Tabla 2.4 según corresponda. El intervalo de

confianza en estas tablas representa que el valor verdadero del factor de emisión de los contaminantes se encuentra con una certeza de 95% dentro de ese intervalo.

2.2.6 Emisiones de CO₂, CH₄, N₂O

Se utiliza los valores establecidos en la metodología de la IPCC (2006), se pueden observar en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Factores de emisión del CO₂, CH₄ y N₂O por defecto para la combustión estacionaria en las industrias manufactureras y construcción

Combustible	CO ₂					
	Factor [kg/MJ]		Intervalo de confianza 95%			
			Superior		Inferior	
Gasolina de motor	0,0693	0,0675	0,073		0,073	
Diésel	0,0741	0,0726	0,0748		0,0748	
Leña	0,112	0,095	0,0132		0,0132	
Combustible	CH ₄			N ₂ O		
	Factor [kg/MJ]	Conf. 95%		Factor [kg/MJ]	Conf. 95%	
		Inf.	Sup.		Inf.	Sup.
Gasolina de motor	3E-06	1E-06	1E-05	6E-07	2,0E-07	2,0E-06
Diésel	3E-06	1E-06	1E-05	6E-07	2,0E-07	2,0E-06
Leña	3E-05	1E-05	1E-04	4E-06	1,5E-06	1,5E-05

Fuente: IPCC (2006)

2.2.7 Emisiones varias

La metodología de la EMEP (2019) establece factores en el caso de uso de combustibles líquidos (gasolina y diésel) y biomasa (madera), estos factores se pueden observar en la Tabla 2.3 y Tabla 2.4 respectivamente.

Tabla 2.3. Factores varios de emisión por defecto para la combustión en industrias manufactureras y construcción para combustibles líquidos

Contaminante	Valor	Unidad	Intervalo de confianza del 95%	
			Inferior	Superior
NO _x	0,000513	kg/MJ	0,000308	0,000718
CO	0,000066	kg/MJ	0,00004	0,000093
NM VOC	0,000025	kg/MJ	0,000015	0,000035
SO _x	0,000047	kg/MJ	0,000028	0,000066
PM ₁₀	0,00002	kg/MJ	0,000012	0,000028
PM _{2,5}	0,00002	kg/MJ	0,000012	0,000028
Pb	8E-11	kg/MJ	4E-11	1,6E-10
Cd	6E-12	kg/MJ	3E-12	1,1E-11
Hg	1,2E-10	kg/MJ	4E-11	1,7E-10

As	3E-11	kg/MJ	2E-11	6E-11
Cr	2E-10	kg/MJ	1E-10	4E-10
Cu	2,2E-10	kg/MJ	1,1E-10	4,3E-10
Ni	8E-12	kg/MJ	4E-12	1,5E-11
Se	1,1E-10	kg/MJ	6E-11	2,2E-10
Zn	2,9E-08	kg/MJ	1,5E-08	5,8E-08

Fuente: EMEP/EEA (2019)

Tabla 2.4. Factores varios de emisión por defecto para la combustión en industrias manufactureras y construcción para uso de biomasa como combustible

Contaminante	Valor	Unidad	Intervalo de confianza del 95%	
			Inferior	Superior
NO _x	0,000091	kg/MJ	0,00002	0,00012
CO	0,00057	kg/MJ	0,00005	0,004
NM VOC	0,0003	kg/MJ	0,000005	0,0005
SO ₂	0,000011	kg/MJ	0,000008	0,00004
NH ₃	0,0000012	kg/MJ	0,0000003	0,0000021
PM ₁₀	0,000143	kg/MJ	0,000071	0,000285
PM _{2,5}	0,00014	kg/MJ	0,00007	0,000279
Pb	2,7E-08	kg/MJ	5E-10	1,18E-07
Cd	1,3E-08	kg/MJ	5E-10	8,7E-08
Hg	5,6E-10	kg/MJ	2E-10	1E-09
As	1,9E-10	kg/MJ	5E-11	1,2E-08
Cr	2,3E-08	kg/MJ	1E-09	0,0000001
Cu	6E-09	kg/MJ	4E-09	8,9E-08
Ni	2E-09	kg/MJ	5E-10	1,6E-08
Se	5E-10	kg/MJ	2,5E-10	1,1E-09
Zn	5,12E-07	kg/MJ	8E-08	0,0000013

Fuente: EMEP/EEA (2019)

2.3 Emisiones totales del sistema

Las emisiones totales de cada contaminante en la manufactura del ladrillo de puerta a puerta se estiman con la sumatoria de las emisiones calculadas con la Ecuación 2.3 de las diferentes fuentes, como se expresa en la Ecuación 2.4 (IPCC, 2006)

$$Emi_c = \sum_f Emi_f$$

Ecuación 2.4. Emisiones totales de cada contaminante en la manufactura del ladrillo

Donde Emi_c son las emisiones en todo el proceso [kg]

2.4 Consumo energético y uso de agua

2.4.1 Energía total durante la manufactura del ladrillo

El consumo energético total durante la manufactura del ladrillo semi-mecanizado se calcula con la sumatoria de la energía térmica de cada combustible encontrado con la Ecuación 2.2 en los respectivos procesos, como se expresa en la Ecuación 2.5.

$$Q_T = \sum_f Q_f$$

Ecuación 2.5. Consumo energético total de la manufactura del ladrillo

Donde Q_T representa el consumo energético total [MJ]

2.4.2 Uso de agua durante la manufactura del ladrillo

El agua, como se observa en la Figura 2.3, se utiliza únicamente en el proceso de mezcla, por lo cual esta sería la cantidad de consumo de agua dentro de la producción del ladrillo

2.5 Evaluación de impacto ambiental

Mediante el software gratuito openLCA se realizará la evaluación de impacto ambiental, en el cual se ingresa los flujos de entrada y salida inventariados en función de la unidad funcional. En este caso de estudio, se utiliza el método de evaluación de impacto a nivel de punto medio, ReCiPe 2016 midpoint (h), entre estos puntos se encuentra el calentamiento global, que permite encontrar el valor de CO₂ equivalente (huella de carbono). Se utiliza la base de datos europea “elcd green delta” debido a que no existen bases de datos con información que se adapten al caso de estudio en nuestro país.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

3.1.1 Inventario de Flujos de Entrada y Salida

Los valores de las entradas se encuentran con los datos de la Tabla 2.1 según cada proceso y utilizando la Ecuación 2.1 para obtener la cantidad respecto a la unidad funcional. El cálculo de las salidas utiliza los valores por unidad funcional de las entradas.

3.1.1.1 Dosificación y Mezclado de Materia Prima

Los valores de las entradas y las salidas se muestran en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 respectivamente.

Tabla 3.1. Flujos de entrada para la dosificación y mezclado

Entrada	Cantidad	Unidad _{producto}	Cantidad por UF $\left[\frac{\text{Unidad}_{\text{producto}}}{\text{kg}_{\text{ladrillo}}} \right]$
Arcilla	225680	kg	3,2994152
Agua	18,95	m ³	0,00027705
Gasolina	16,6936668	kg	2,44E-04
Energía térmica de la gasolina	669,249102	MJ	0,00978434

Fuente: Propia

Tabla 3.2. Flujos de salida de la dosificación y mezclado

Salida	Cantidad $\left[\frac{\text{kg}_{\text{salida}}}{\text{kg}_{\text{ladrillo}}} \right]$
Mezcla purificada	2,96947368
CO ₂	0,00067806
CH ₄	2,9353E-08
N ₂ O	5,8706E-09
NO _x	5,0194E-06
CO	6,4577E-07
NMVOC	2,4461E-07
SO _x	4,5986E-07
PM ₁₀	1,9569E-07
PM _{2,5}	1,9569E-07
Pb	7,8275E-13
Cd	5,8706E-14
Hg	1,1741E-12
As	2,9353E-13
Cr	1,9569E-12

Cu	2,1526E-12
Ni	7,8275E-14
Se	1,0763E-12
Zn	2,8375E-10

Fuente: Propia

3.1.1.2 Extrusión del Ladrillo

Las Tabla 3.3 y Tabla 3.4 indican los valores de entradas y salidas, respectivamente, en este proceso.

Tabla 3.3. Flujos de entrada para la extrusión del ladrillo macizo

Entrada	Cantidad	Unidad _{producto}	Cantidad por UF $\left[\frac{\text{Unidad}_{\text{producto}}}{\text{kg}_{\text{ladrillo}}} \right]$
Mezcla purificada	203112	kg	2,96947368
Diésel	31,5328	kg	0,00046101
Energía térmica del diésel	1359,06368	MJ	0,01986935

Fuente: Propia

Tabla 3.4. Flujos de salida de la extrusión de ladrillo

Salida	Cantidad $\left[\frac{\text{kg}_{\text{salida}}}{\text{kg}_{\text{ladrillo}}} \right]$
CO ₂	0,00147232
CH ₄	5,9608E-08
N ₂ O	1,1922E-08
NO _x	1,0193E-05
CO	1,3114E-06
NMVOC	4,9673E-07
SO _x	9,3386E-07
PM ₁₀	3,9739E-07
PM _{2,5}	3,9739E-07
Pb	1,5895E-12
Cd	1,1922E-13
Hg	2,3843E-12
As	5,9608E-13
Cr	3,9739E-12
Cu	4,3713E-12
Ni	1,5895E-13
Se	2,1856E-12
Zn	5,7621E-10

Fuente: Propia

3.1.1.3 Secado y Quema de Ladrillo

Las entradas de la quema del ladrillo se indican en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Flujos de entrada para la quema de ladrillo macizo

Entrada	Cantidad	Unidad _{producto}	Cantidad por UF $\left[\frac{\text{Unidad}_{\text{producto}}}{\text{kg}_{\text{ladrillo}}}\right]$
Diésel	2,7822778	kg	4,0677E-05
Leña	16296	kg	0,23824561
Energía térmica del diésel	111,541517	MJ	0,00163072
Energía térmica de la leña	257476,8	MJ	3,7642807

Fuente: Propia

Los flujos de salida del secado y quema del ladrillo se aprecian en la Tabla 3.6. Las emisiones son las provocadas por la combustión de diésel y leña.

Tabla 3.6. Flujos de salida del secado y quema de ladrillo

Salida	Cantidad $\left[\frac{\text{kg}_{\text{salida}}}{\text{kg}_{\text{ladrillo}}}\right]$
CO ₂	0,42172028
CH ₄	0,00011293
N ₂ O	1,5058E-05
NO _x	0,00034339
CO	0,00214575
NM VOC	0,00112932
SO ₂	4,1407E-05
NH ₃	4,5171E-06
SO _x	7,6644E-08
PM ₁₀	0,00053832
PM _{2,5}	0,00052703
Pb	1,0164E-07
Cd	4,8936E-08
Hg	2,1082E-09
As	7,1526E-10
Cr	8,6579E-08
Cu	2,2586E-08
Ni	7,5286E-09
Se	1,8823E-09
Zn	1,9274E-06

Fuente: Propia

3.1.2 Emisiones totales de la producción de ladrillo

Las emisiones totales de cada contaminante, calculadas con la Ecuación 2.4 se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Emisiones totales de la manufactura de ladrillo

Salida	Cantidad $\left[\frac{kg_{salida}}{kg_{ladrillo}} \right]$
CO ₂	0,423870649
CH ₄	0,000113022
N ₂ O	1,50759E-05
NO _x	0,000358598
CO	0,002147705
NM VOC	0,001130066
SO ₂	4,14071E-05
NH ₃	4,51714E-06
SO _x	1,47037E-06
PM ₁₀	0,000538918
PM _{2,5}	0,000527625
Pb	1,01638E-07
Cd	4,89358E-08
Hg	2,11175E-09
As	7,16152E-10
Cr	8,65847E-08
Cu	2,25926E-08
Ni	7,52881E-09
Se	1,88558E-09
Zn	1,92822E-06

Fuente: Propia

3.1.3 Consumo energético total

Los datos de energía térmica extraídos de la Tabla 3.1, Tabla 3.3 y Tabla 3.5 y el valor total calculado con la Ecuación 2.5 se puede apreciar en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Energía consumida en manufactura del ladrillo

Combustible	Energía Térmica del Proceso (MJ)			
	Dosificación	Extrusión	Quema	Total
Gasolina	0,010	0	0	0,010
Diesel	0	0,020	0,002	0,022
Leña	0	0	3,764	3,764
Total	0,010	0,020	3,766	3,796

Fuente: Propia

3.1.4 Consumo de agua

El agua que consume durante la producción del ladrillo es la que se utiliza en la mezcla, como se observa en la Figura 2.3, igual a $0,00027705 \text{ [m}^3/\text{kg}_{\text{ladrillo}}]$.

3.1.5 Huella de carbono (openLCA)

Los flujos inventariados se ingresan en el programa openLCA. Los valores ingresados son extraídos de la Tabla 3.1 y la Tabla 3.7, estos se pueden observar en el Anexo 5.1. Posterior a ingresar los flujos, el programa calcula los diferentes indicadores de impacto, estos se pueden observar en el Anexo 5.2. Los flujos y los resultados más relevantes se pueden observar en la Figura 3.1.

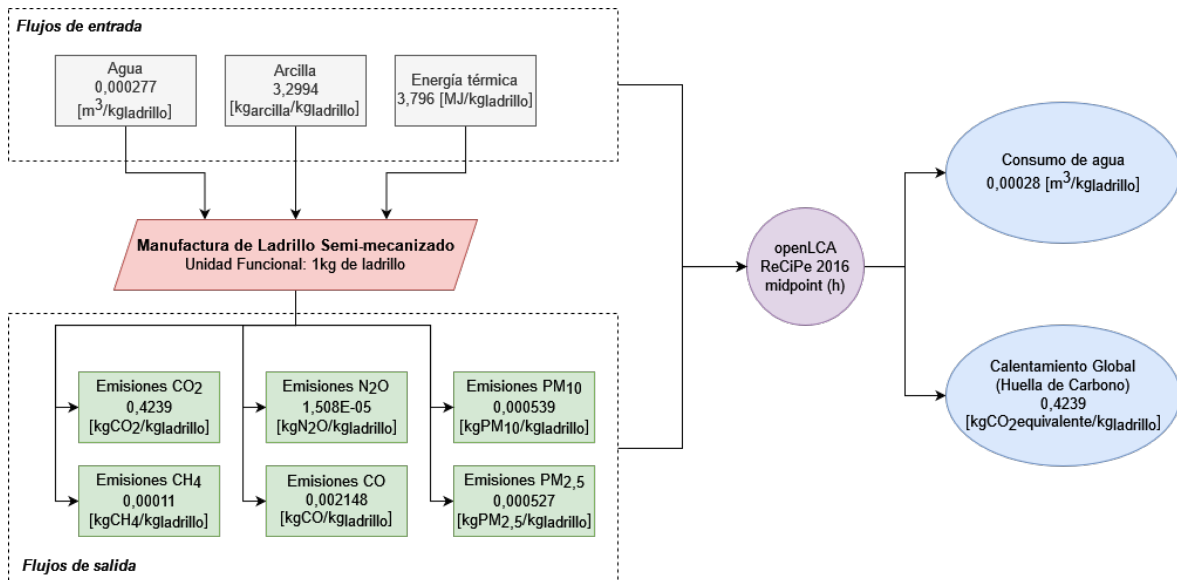


Figura 3.1. Flujos y resultados más relevantes de ACV en openLCA.

Fuente: Propia

La huella de carbono o emisiones de CO₂ equivalente es el resultado de impacto de la categoría Global Warming (Calentamiento Global) y tiene un valor de $0,4294 \text{ [kgCO}_2 \text{ equivalente}]$.

3.2 Discusión

Es importante estudiar el consumo energético, la huella de carbono y el uso de agua en el sector ladrillero porque este cumple un papel importante en la construcción,. En Ecuador, algunos de los estudios encontrados referente a un ACV del ladrillo son los de Alvear & Palomeque (2017) y Venegas (2018). Estos estudios realizan un análisis de inventario de puerta a puerta, a diferencia del presente trabajo que realiza el ACV cumpliendo las 4 fases establecidas en la norma NTE ISO 14040.

Los estudios mencionados se realizan cada uno en una ladrillera diferente, pero los resultados pueden ser comparados debido al uso de la misma unidad funcional y el proceso de producción es el mismo. En el caso del estudio de Alvear & Palomeque (2017) como flujo de salida se tiene solamente las emisiones de CO₂, este trabajo no estima las varias emisiones contaminantes que se producen como este el trabajo realizado. El estudio de Venegas (2018) se asemeja al de Alvear & Palomeque (2017) en este sentido, con la diferencia de que también se calcula las emisiones de material particulado.

El consumo energético calculado por Alvear & Palomeque (2017) es de 1,33 [MJ/kg_{ladrillo}]. Un valor menor con respecto a la cantidad de calculada de 3,79 [MJ/kg_{ladrillo}] en este estudio. La diferencia radica en el uso de ventiladores en la combustión, la ladrillera en la cual se realiza el estudio utiliza ventiladores en el proceso de quema del ladrillo. Los ventiladores se encargan de mantener la leña encendida, aprovechando de mejor manera el combustible, distribuyendo el calor. La energía térmica de la quema de ladrillo, con un valor de 3,77 [MJ/kg_{ladrillo}] representa el 99% del total de la energía, lo que indica que este proceso es uno de los más importantes en la producción de ladrillo.

El uso de ventiladores involucra cambios no solamente en el consumo energético, sino también en la cantidad de emisiones generadas, al tener aprovechar el combustible, se reduce el uso de este, disminuyendo la cantidad de emisiones generadas. Un caso claro es contrastar las emisiones de CO₂ del estudio de Venegas (2018), igual a 0,188 [kg/kg_{ladrillo}], y el valor encontrado en este estudio de 0,429 [kg], siendo un valor mayor por la razón mencionada

Los flujos de entrada inventariados presentan variaciones respecto a los estudios mencionados, ya que los datos varían según el productor de ladrillo. Cada productor conoce la cantidad de arcilla, agua y combustible que utiliza en su ciclo de producción (quema). Además, los ladrillos pueden ser fabricados en diferentes dimensiones, según como se desee, siempre y cuando se cumpla con las configuraciones modulares. Para calcular los flujos de salida se utilizan guías internacionales debido a la escasez de factores de emisión de contaminantes en Ecuador. Para esta estimación se utiliza el menor nivel de precisión de los factores. El hecho de tener unos factores de emisión nacionales brinda una precisión mayor en los resultados y pudiéndose usar el nivel de precisión más alto de los factores de emisión de contaminantes

El único uso de agua se tiene para realizar la mezcla con la arcilla. El estudio de Christoforou (2016) evalúa el análisis de ciclo de vida del ladrillo en 6 escenarios, donde el consumo de agua oscila entre 0,000388 y 0,000394 [m³/kg_{ladrillo}], siendo un valor cercano al encontrado de 0,000285541 [m³/kg_{ladrillo}]. El estudio de Christoforou (2016) se realiza de

la cuna a la puerta, no es una problemática en la comparación debido a que el uso de agua se da en el solamente en el mezclado. En este estudio se realiza una dosificación de mezcla solamente para 9 ladrillos, lo que implica que la cantidad de agua utilizada es más controlada, a diferencia del presente estudio que al trabajar con una cantidad de 18000 ladrillos puede existir un problema en la estimación del uso de este recurso.

La huella de carbono encontrada de 0,4294 [kgCO₂ equivalente/kg_{ladrillo}] es similar al valor de 0,373 [kgCO₂ equivalente/kg_{ladrillo}] presentada en el estudio de Swisscontact (2013), para realizar la comparación se toma el valor de la huella de carbono en la producción de ladrillos.

3.3 Conclusiones

Se realizó un estudio de análisis de ciclo de vida del ladrillo semi-mecanizado en el Ecuador para un ciclo de producción (quema), calculando el consumo energético, el uso de agua y la huella de carbono que involucran el proceso de fabricación del ladrillo. Este estudio se realizó a un caso específico de producción, utilizando 1 [kg] de ladrillo como unidad funcional.

Los flujos que definen el análisis de ciclo de vida del ladrillo semi-mecanizado de puerta a puerta son: arcilla, agua, combustibles (diésel, leña, gasolina) y emisiones contaminantes. Las emisiones contaminantes, se encontraron mediante metodologías internacionales que permiten estimar los valores bajo ciertos factores de emisión.

La energía consumida en la manufactura de ladrillo semi-mecanizado es de 3,796 [MJ/kg_{ladrillo}], teniendo a la quema de ladrillo con un enfoque especial debido a que la combustión de leña y diésel en este proceso representa un 99% del total mencionado.

El uso de agua es vital para realizar el mezclado y batido de la arcilla. El consumo de agua es de 0,000286 [m³/kg_{ladrillo}]. Este valor de consumo de este recurso es indispensable para la producción de ladrillo a pesar de se utilice solamente en los pasos iniciales de la fabricación del ladrillo semi-mecanizado

La huella de carbono se encuentra relacionada con los diferentes procesos en los que se involucra la combustión, en un año de producción de ladrillo semi-mecanizado se tiene 3,86 [kgCO₂ equivalente/kg_{ladrillo}], debido a que para el caso de estudio se tiene 9 ciclos de producción (quemados) en un año.

3.4 Recomendaciones

Estudios futuros deberán aumentar la frontera de este estudio. Por ejemplo, se recomienda hacer el estudio de cuna a tumba, para así tener una mejor idea del impacto ambiental que representa la producción de estos materiales de combustión.

Utilizar bases de datos y factores de emisión que se adapten al país, ya que en este estudio se utilizaron bases de datos y guías de factores de emisión internacionales, para evitar la incertidumbre de datos y la falta de precisión de factores de emisión y obtener resultados que permitan conocer mejor la realidad del país respecto al impacto ambiental en el sector de la construcción.

Unificar los datos de producción del ladrillo de varios productores con el fin de obtener un conjunto de datos que representen y estandaricen la manufactura del ladrillo semi-mecanizado buscando empresas con máquinas similares, procesos de producción parecidos y que trabajen con una cantidad de ladrillos igual.

Analizar solamente el proceso de quema del ladrillo mediante diferentes casos de estudio en los cuales se evalúe la diferencia entre el uso de los diversos hornos, el tipo de combustible y el uso de ventilador, para comparar la eficiencia de combustión, energía consumida y las emisiones contaminantes generadas.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvear, P., & Palomeque, R. (2017). *Análisis del inventario del ciclo de vida del ladrillo utilizado en la ciudad de Cuenca: aspectos energéticos, medio ambientales, sociales, económicos y culturales*. Universidad de Cuenca.
- Bare, J. C., & Gloria, T. P. (2006). Critical analysis of the mathematical relationships and comprehensiveness of life cycle impact assessment approaches. *Environmental Science and Technology*, 40(4), 1104–1113. <https://doi.org/10.1021/es051639b>
- Barranzuela, J. (2014). *Proceso Productivo de los Ladrillos de Arcilla Producidos en la Región Piura*. Universidad de Piura.
- Bastidas, E., & Bolaños, J. (2014). *Estudio del desempeño de acondicionadores de combustible en vehículos, a través de la inducción magnética en la re polimerización del Diesel* [Universidad Internacional del Ecuador]. <http://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/148/1/T-UIDE-0145.pdf>
- Cao, C. (2017). Sustainability and life assessment of high strength natural fibre composites in construction. In *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00021-2>
- Çengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica* (McGRAW-HILL/INTERAMERICANA (ed.); Séptima Ed). McGraw-Hill.
- Chapagain, A. K., & James, K. (2013). Accounting for the Impact of Food Waste on Water Resources and Climate Change. In *Food Industry Wastes* (First Edition). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391921-2.00012-3>
- Christoforou, E., Kylili, A., Fokaides, P. A., & Ioannou, I. (2016). Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks. *Journal of Cleaner Production*, 112, 443–452. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.016>
- Dabaieh, M., Heinonen, J., El-Mahdy, D., & Hassan, D. M. (2020). A comparative study of life cycle carbon emissions and embodied energy between sun-dried bricks and fired clay bricks. *Journal of Cleaner Production*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122998>
- EMEP/EEA. (2019). Manufacturing industries and construction (combustion). In *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook: Vol. 1.A.2* (Issue 1, pp. 1–7).
- Fajardo, Á. (2017). *Diseño de una Planta de Elaboración de Pastas de Moldeo y Juguetes Lúdicos con Material Arcilloso de Cotopaxi y Pastaza* [Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17056/1/CD-7639.pdf>
- Figuerola, E., & Martínez, J. (2000). *Diseño de un Horno para la Cocción de Ladrillos Cerámicos utilizando Gas Natural como Combustible y Construcción de un Prototipo*. Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar.

- Fontalvo, E., & Gutiérrez, E. (2014). *Diseño De Un Horno Para Coccion De Ladrillos Refractarios En Una Empresa Del Sector Ladrillero*. Universidad Autónoma del Caribe.
- Gallegos, M. (2005). *Análisis Termoquímico De Los Motores De Combustión Interna a Gasolina Mediante El Antidetonante Metil Terbutil Eter (Mtbe)*. Escuela Politécnica del Ejército.
- García, G., & Pañi, L. (2013). *Optimización de la Eficiencia Energética de la Leña (Eucalyptus Globulus) como Combustible en un Modelo de Horno de Ladrillo Artesanal, a través del Análisis y Modificación de las Características del Combustible*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Guo, S., Zheng, S., Hu, Y., Hong, J., Wu, X., & Tang, M. (2019). Embodied energy use in the global construction industry. *Applied Energy*, 256(May), 113838. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113838>
- INEC. (2017). *Panorama laboral empresarial del Ecuador*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Libros/Panorama Laboral 2017.pdf>
- IPCC. (2006). Stationary combustion. In *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Vol. 2, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/BF00914340>
- Kumbhar, S., Kulkarni, N., Rao, A. B., & Rao, B. (2014). Environmental life cycle assessment of traditional bricks in western Maharashtra, India. *Energy Procedia*, 54(022), 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.269>
- Lesage, P., & Samson, R. (2016). The Quebec Life Cycle Inventory Database Project: Using the ecoinvent database to generate, review, integrate, and host regional LCI data. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1282–1289. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0593-1>
- MacDonald, R., & Reitmeier, C. (2017). Sustainability of the Food System. In *Understanding Food Systems*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804445-2.00008-9>
- Martínez-Rocamora, A., Solís-Guzmán, J., & Marrero, M. (2016). LCA databases focused on construction materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.243>
- Maza, M. E. (2011). *Producción más Limpia para Ladrilleras en la Parroquia Sinincay* (Vol. 0, Issue 0) [Universidad del Azuay]. <file:///C:/Users/user/Desktop/Quishpi - UNIVERSIDAD DEL AZUAY.pdf>
- Miranda, I., & Pereira, H. (2016). Variation of wood and bark density and production in coppiced Eucalyptus globulus trees in a second rotation. *IForest*, 9(APR2016), 270–275. <https://doi.org/10.3832/ifor1442-008>
- Murmu, A. L., & Patel, A. (2018). Towards sustainable bricks production: An overview.

- Construction and Building Materials*, 165, 112–125.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.038>
- NTE INEN 293. (2014). *Ladrillos Ceramicos. Definiciones. Clasificación Y Condiciones Generales*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/293.pdf>
- NTE INEN 297. (1977). *Ladrillos Cerámicos. Requisitos*.
<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/297.pdf>
- NTE INEN 317. (2014). *Coordinación modular de construcción. Dimensiones modulares de ladrillos cerámicos*. (pp. 2–3). www.inen.gob.ec
- Organización Internacional de Normalización. (2006a). *Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*.
- Organización Internacional de Normalización. (2006b). *Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices*.
- Ramos Huarachi, D. A., Gonçalves, G., de Francisco, A. C., Canteri, M. H. G., & Piekarski, C. M. (2020). Life cycle assessment of traditional and alternative bricks: A review. *Environmental Impact Assessment Review*, 80(April 2019), 106335.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106335>
- Swisscontact. (2013). *Estudio de Análisis de Ciclo de Vida de Ladrillos y Bloques de Concreto San Jerónimo - Cusco* (p. 47).
- Tenesaca, E. (2019). *Caracterización de arcillas y pastas usadas en la elaboración artesanal de ladrillos en la parroquia Susudel y su optimización para la fabricación de ladrillos para recubrimiento de pisos* [Universidad de Cuenca].
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/22460/1/tesis.pdf>
- Tenesaca, M., & Rasco, J. (2017). *Diseño de un Modelo de Negocios Para el Sector Ladrillero Artesanal del Cantón Cuenca, Período 2017-2019*. Universidad de Cuenca.
- Venegas, A. (2018). *Evaluación De La Energía Contendida, Emisiones De CO2 Y Material Particulado En La Fabricación Del Ladrillo Semi-Mecanizado Tochano en Cuenca, a Través del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)* [Universidad de Cuenca].
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/29319/1/MscArqAndrésVenegas.pdf>

5 ANEXOS

5.1 Flujos inventariados ingresados al programa openLCA

▼ Entradas			
Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad
☒ Clay, bentonite, in ground	Resource/in ground	3.29900	kg
☒ diesel	Energy carriers and technol...	0.02200	MJ
☒ drinking water	Materials production/Water	0.27705	kg
☒ Energy, from wood	Resource/unspecified	3.76400	MJ
☒ Gasoline (regular)	Energy carriers and technol...	0.01000	MJ

▼ Salidas			
Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad
☒ Ammonia	Emission to air/high popula...	4.51700E-6	kg
☒ Arsenic	Emission to air/high popula...	7.16200E-10	kg
☒ Cadmium	Emission to air/high popula...	4.89400E-8	kg
☒ Carbon dioxide	Emission to air/high popula...	0.42387	kg
☒ Carbon monoxide	Emission to air/high popula...	0.00215	kg
☒ Chromium	Emission to air/high popula...	8.65900E-8	kg
☒ Copper	Emission to air/high popula...	2.25900E-8	kg
☒ Dinitrogen monoxide	Emission to air/high popula...	1.50700E-5	kg
☒ Ladrillo - EC	Ladrillo	1.00000	kg
☒ Lead	Emission to air/high popula...	1.10160E-7	kg
☒ Mercury	Emission to air/high popula...	2.11800E-9	kg
☒ Methane	Emission to air/high popula...	0.00011	kg
☒ Nickel	Emission to air/high popula...	7.52900E-9	kg
☒ Nitrogen oxides	Emission to air/high popula...	0.00359	kg
☒ NMVOC, non-methane volatile organ...	Emission to air/high popula...	0.00113	kg
☒ Particulates, < 10 um	Emission to air/high popula...	0.00054	kg
☒ Particulates, < 2.5 um	Emission to air/high popula...	0.00053	kg
☒ Selenium	Emission to air/high popula...	1.88560E-9	kg
☒ Sulfur dioxide	Emission to air/high popula...	4.14070E-5	kg
☒ Sulfur oxides	Emission to air/high popula...	1.47040E-6	kg
☒ Zinc	Emission to air/hiah popula...	1.92800E-6	kg

5.2 Categorías de impacto ambiental (Resultado openLCA)

Nombre	Cat...	Res...	Fa...	Resultado de impacto	Unidad
> Freshwater eutrophication				4.82345E-9	kg P eq
> Human non-carcinogenic toxicity				0.02024	kg 1,4-DCB
> Marine ecotoxicity				0.00024	kg 1,4-DCB
> Ionizing radiation				3.71408E-5	kBq Co-60 eq
> Fine particulate matter formation				0.00094	kg PM2.5 eq
> Marine eutrophication				3.56918E-8	kg N eq
> Stratospheric ozone depletion				1.66120E-7	kg CFC11 eq
> Freshwater ecotoxicity				1.18006E-5	kg 1,4-DCB
> Ozone formation, Terrestrial ecosystems				0.00392	kg NOx eq
> Terrestrial acidification				0.00135	kg SO2 eq
> Fossil resource scarcity				0.00000	kg oil eq
> Water consumption				0.00028	m3
> Land use				8.54253E-6	m2a crop eq
> Global warming				0.42980	kg CO2 eq
> Mineral resource scarcity				0.03563	kg Cu eq
> Ozone formation, Human health				0.00379	kg NOx eq
> Terrestrial ecotoxicity				0.30884	kg 1,4-DCB
> Human carcinogenic toxicity				1.72706E-5	kg 1,4-DCB