UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

MAESTRÍA EN ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA, CONFORT Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

"DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA CONTENIDA Y EMISIONES DE $C0_2$ EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO."

ARTÍCULO CIENTÍFICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGISTER EN ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA, CONFORT Y EFICIENCIA ENERGÉTICA.

AUTORA: ARQ. ANA ESTEFANÍA LEÓN VÉLEZ
C.I.: 0301916375

DIRECTORA: ARQ. VANESSA FERNANDA GUILLÉN MENA, MSC.
C.I.: 0104436357

CUENCA-ECUADOR
2017

Universidad de Cuenca

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institu

Ana Estefanía León Vélez en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Determinación de la energía contenida y emisiones de CO_2 en el proceso de fabricación del Cemento", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de EducaciónSuperior.

Cuenca, 25 de noviembre de 2017.

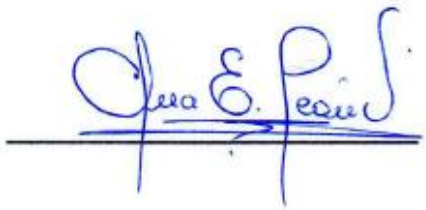
Ana Estefanía León Vélez

C.I: 0301916375

Universidad de Cuenca
Cláusula de Propiedad Intelectual

Ana Estefanía León Vélez, autora del trabajo de titulación "Determinación de la energía contenida y emisiones de CO_2 en el proceso de fabricación del Cemento", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 25 de noviembre de 2017



Ana Estefanía León Vélez

C.I: 0301916375

Determinación de la energía contenida y emisiones de $C0_2$ en el proceso de fabricación del Cemento.

Ana Estefanía León Vélez
Maestría de Arquitectura Bioclimática, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. ana.leonv@ucuenca.ec

Vanessa Fernanda Guillén Mena
Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. vanessa.guillen@ucuenca.edu.ec

Resumen

La industria del cemento es un sector importante emisor de CO_2 en el mundo, debido al consumo de grandes cantidades de materia prima y energía que emplea en su producción. El cemento es un material indispensable en el sector de la construcción, conocer el impacto ambiental que genera su producción en el Ecuador es indispensable para generar datos locales. Esta investigación ha permitido determinar la energía contenida y las emisiones de CO_2 en el proceso de fabricación del cemento, a través de la aplicación de las metodologías del Análisis del Ciclo de Vida y las Directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. El estudio considera la producción de 1 tonelada de cemento con un enfoque de puerta a puerta, a través de la recopilación de datos en una planta cementera correspondientes a 1 año de producción (año 2016), los resultados muestran que su producción requiere 3.191,64 MJ de energía y genera emisiones de 510,54 Kg CO_2. El mayor consumo energético y emisiones liberadas a la atmósfera durante su producción, se registra durante el proceso de fabricación del clínker, atribuyendo el 92,73% de emisiones en el sistema.

Palabras claves

Cemento, análisis del ciclo de vida, clínker, energía contenida, emisiones de CO_2.

Abstract

The cement industry is an important sector of CO2 emissions in the world, due to the consumption of large quantities of raw material and energy used during its production process. Cement is an essential material in the construction sector, and knowing the environmental impact caused by its manufacturing in Ecuador is key for obtaining local data. This research has allowed to determine the embodied energy and CO_2 emissions in the cement manufacturing process, through the implementation of life cycle assessment methodologies and the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. The study considers the production of 1 ton of cement under a door to door approach, by collecting data from a cement plant corresponding to 1 year of production (2016). The results show that its production requires 3.191,64 MJ of energy and generates 510,54 Kg of CO_2 emissions. The highest energy consumption and emissions released into the atmosphere during production were recorded during the clinker manufacturing process, attributing 92.73% of emissions in the system.

Keywork

Cement production, life cycle analysis, consumption of energy resources, global warming.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha provocado un impacto a escala mundial, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) han incrementado desde la era preindustrial, alcanzando las mayores concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y oxido nitroso (N_2O), es probable que los efectos de estas emisiones sean la causa del calentamiento observado a partir de la segunda mitad del siglo XX[1].

La preocupación por los problemas ambientales, se manifestaron con la aparición del informe: *Nuestro Futuro Común* en 1987, en donde se incorpora el concepto de sostenibilidad como *"aquel que garantiza las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades"*[2].

Como consecuencia de este informe, surgen políticas de mitigación a través de acuerdos internacionales como: la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro denominada Agenda 21, la Cumbre de Kyoto en 1997, la XVI Conferencia de Naciones Unidas sobre Cambio Climático en 2010, el Acuerdo de París en 2015, cuyos propósitos eran establecer acuerdos para controlar el calentamiento del planeta y reducir la emisión de gases de efecto invernadero[3].

A pesar de la implementación de estas políticas de mitigación, las emisiones de GEI han estado en constante aumento desde el año 1970 al 2010; registrándose el mayor aumento entre los años 2000 y 2010 con un incremento promedio anual de 1 $GtCO_2eq$ (gigatonelada de dióxido de carbono equivalente), este valor es superior al período comprendido entre los años 1970 y 2000 en los cuales la cifra de incremento promedio anual registraba un valor de 0,4 $GtCO_2eq$[4].

Las emisiones de CO_2 procedentes de la quema de combustibles fósiles y procesos industriales contribuyeron con el 78% de las emisiones de GEI totales de 1970 a 2010, su contribución porcentual fue similar entre los años 2000 a 2010[4].

Las emisiones de CO_2 provenientes de la quema de combustibles fósiles, producción de cemento y la combustión en antorcha entre los años 1750 y 1970 fueron de 420±35 $GtCO_2$, hacia el año 2010 estos valores alcanzaron los 1.300±110 $GtCO_2$. Las emisiones anuales de GEI han aumentado 10 $GtCO_2eq$ entre los años 2000 y 2010, incremento que corresponde de forma directa a los sectores: suministro de energía (47%), industria (30%), transporte (11%) y edificios (3%)[4].

Dentro del sector industrial, las actividades de la construcción representan gran parte del consumo de energía y las emisiones de carbono [5], las obras civiles y la construcción de edificios consumen el 60% de las materias primas extraídas de la litosfera [6], siendo la actividad que genera el mayor consumo de los recursos naturales y por consiguiente de emisiones atmosféricas[7] [8].

La industria de la construcción utiliza enormes cantidades de materias primas y requiere un alto consumo de energía y, por lo tanto, se considera una industria que provoca el agotamiento de los recursos naturales y los impactos ambientales negativos.

Las principales causas del impacto ambiental de la arquitectura se encuentran en el consumo de recursos no renovables y en la generación de residuos contaminantes, con respecto al consumo energético, se estima que 1m2 de construcción requiere un consumo de energía equivalente a 6.000 MJ y se considera que durante una vida útil de 50 años llegaría a alcanzar un valor de 30.000 MJ/m2 [9].

El cemento es un material básico para la construcción [10], siendo el material de construcción más utilizado, su producción mundial se ha incrementado de 2.100 millones de toneladas en el año 2004, a 4.300 millones de toneladas en el año 2014 [11], su producción implica el consumo de grandes cantidades de materias primas y energía [12]; es un material esencial que se usa como componente del hormigón [13].

La industria de producción de cemento en todo el mundo es uno de los mayores sectores industriales emisores de CO_2 [14]siendo el responsable del 5% de sus emisiones mundiales[15][16][17][18].

En su fabricación, la mitad de las emisiones de CO_2 provienen de la combustión de fósiles y la mitad restante es emitida por la calcinación de piedra caliza[19], su contenido energético dependerá de su ubicación geográfica, la eficiencia de su producción, la selección de combustibles para el horno y la combinación de fuentes de energía utilizadas en la generación de electricidad [19].

La producción de cemento de América Latina y el Caribe equivale al 4,7% de la producción mundial (2011 y estimación 2012), según las cifras del Informe International Cement Review. En el año 2012 el consumo per cápita estimado para América Latina y el Caribe es de 301 kg/hab[20]; para Ecuador es de 359.26 kg/hab en el año 2015 [21].

Según el Balance Energético Nacional 2016, en el Ecuador, la industria es el segundo sector con mayor demanda energética, con una participación en el año 2015 del 19%, mientras que el sector de la construcción con un 11% [22]; actividades que registran emisiones de GEI de 5.739 KT CO_2 eq y 3.683 KT CO_2 eq, respectivamente [23].

La construcción pertenece a uno de los sectores más dinámicos de la economía de nuestro país, teniendo una participación del 11,37% dentro del total del PIB en el año 2015, el cual ha mantenido un crecimiento sostenido entre los años 2003 y 2015 con un promedio del 8,98% [24].

De acuerdo a la última "Encuesta de Edificaciones 2015" elaborada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEC, se determina un incremento del 29,2% en la emisión de permisos de construcción en los últimos 15 años, la provincia de Guayas registra el 20,1% y Azuay el 9,3%. Según cantones, Cuenca representa el 7,6% del total de emisión de permisos de construcción, siendo el principal cantón a nivel del país. El material predominante usado en cimientos es el hormigón armado y el hormigón ciclópeo con el 79,6% y el 9,3% respectivamente, en estructura el 92,7% es hormigón armado, en paredes el 57,6% es bloque, en cubierta el 54,2 % es hormigón armado [25] ; evidenciándose que el material más utilizado es el hormigón, siendo el cemento el componente principal para su fabricación [26], por lo tanto su análisis ambiental se vuelve más relevante [27].

El consumo de cemento en nuestro país ha generado un incremento de alrededor del 7,91% en la comercialización del mismo, al pasar de 5,28 a 5,70 millones de toneladas en los años 2010-2011[28], siendo el material que ha tenido un significativo incremento en su producción; en la provincia del Azuay el consumo hacia el año 2012 fue de 458.694 toneladas [21].

1.1 Estudios realizados sobre el Cemento

"El cemento es un polvo fino inorgánico no metálico que al mezclarse con el agua forma una pasta que se endurece"[29], calificado como producto básico en la construcción, el cemento es el resultado de la calcinación de materiales pétreos que producen el denominado clínker, el cual es molido en procesos complementarios con fracciones de yeso y producen un material con propiedades aglomerantes llamado cemento portland[30]; en el país el cemento más utilizado es el cemento hidráulico tipo GU, producido bajo la norma [31], está compuesto principalmente por clínker, yeso y puzolana [27].

El cemento portland puzolánico se define como "*Cemento hidráulico consistente de una mezcla íntima y uniforme de cemento portland o cemento portland de escoria de altos hornos y puzolana fina producido por molido conjunto de clínker de cemento portland y puzolana; por una mezcla de cemento portland o cemento portland de escoria de altos hornos y puzolana finamente dividida o una combinación de molido conjunto y mezclado en el cual, la cantidad del componente puzolana está dentro de los límites especificados*" [32].

Algunos estudios a nivel mundial se han realizado para cuantificar el consumo de energía y el CO_2 aportando a la atmósfera en el proceso de fabricación del cemento, a través de la aplicación de la metodología del ACV o estudios de Inventario de Ciclo de vida (ICV), [8][33][34][35][15][36].

En el estudio *"ACV comparativo sobre el uso de materiales de desecho en la industria del cemento: Caso de estudio de Hong Kong"*, se determina que la producción ordinaria de cemento genera altos impactos ambientales debido a la importación de materias primas y la quema de combustibles fósiles, mientras que el uso de materiales alternativos como cenizas volantes, polvo de vidrio, el uso de biocombustibles reducen un 12% de emisiones de CO_2 y un 15% de consumo de energía, con respecto al proceso tradicional [8].

En el artículo *"Evaluación del ciclo de vida de la producción de cemento: Caso de estudio Brasil"*, se utiliza la metodología de la evaluación del ciclo de vida para determinar los impactos ambientales de la industria cementera brasileña como el agotamiento de recursos, toxicidad, agotamiento de la capa de ozono, la acidificación, eutrofización entre otros, los resultados muestran que el transporte genera la mayor contribución a estos impactos, seguidos de la producción de combustible y la clinkerización, por lo que la sustitución de combustibles fósiles por combustibles alternativos es una alternativa para disminuir los impactos [34].

En la *investigación "Análisis del impacto ambiental del ciclo de vida de una cadena típica de producción de cemento: Caso de estudio China"* se determina que el proceso de calcinación es el mayor contribuyente de emisiones ambientales y que debe ser considerado el punto de control para lograr el ahorro de energía y en consecuencia la reducción de emisiones, el uso de la paja de maíz como sustituto del carbón, la recuperación del calor y la cogeneración son alternativas para lograr una mitigación ambiental en su producción [33].

En algunas investigaciones se identifica que la estructuración del ICV se realiza en dos subsistemas, Producción del clínker + Producción del cemento [30] [37], lo cual permite analizar detalladamente los procesos por separado.

1.2 Análisis del Ciclo de Vida

El Análisis del Ciclo de Vida, es una metodología que permite evaluar la carga ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de su ciclo de vida basada en los lineamientos de las Normas [38], [39], [40]. Para ello, requiere de la recopilación de datos de entradas y salidas; se conocen como inputs/outputs.

- Inputs/entradas: Comprende el uso de los recursos y materias primas, partes y productos, transporte, energía.

- Outputs/salidas: Emisiones al aire, al agua y al suelo, así como los residuos y los subproductos que se tienen en cuenta en cada proceso.

La figura 1 muestra el concepto del análisis del ciclo de vida y sus fases.

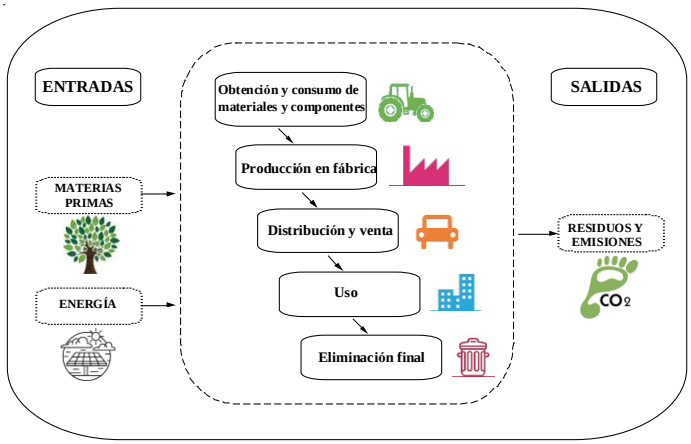


Figura 1. Concepto de un análisis de Ciclo de Vida y sus fases[41]

La figura 2 muestra el marco establecido para la estandarización de la metodología de ACV, la misma que comprende cuatro fases:

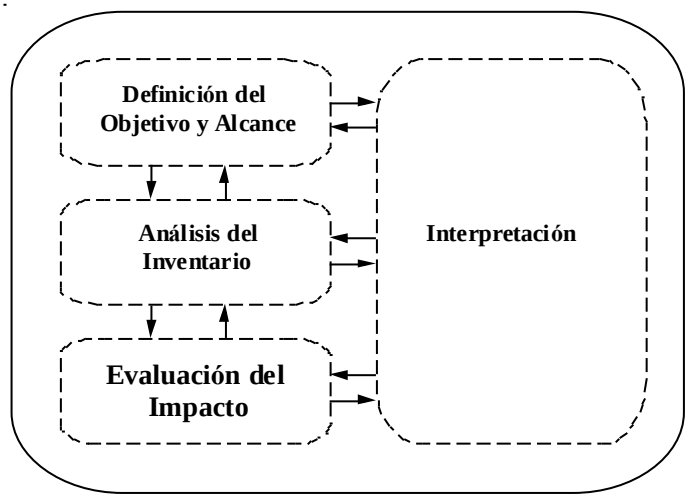


Figura 2. Esquema de un ACV según NTE INEN – ISO14040:2006

- **Definición de Objetivos y Alcance**: Define el objetivo y el alcance de acuerdo con los límites del sistema, su unidad funcional y los flujos dentro del ciclo de vida, la calidad exigida a los datos, y los parámetros tecnológicos y de evaluación[41].

- **Desarrollo del Inventario de Ciclo de Vida (ICV)**: Es la fase en la que se recogen los datos correspondientes a las entradas y salidas para todos los procesos del sistema de producto [41].

- **Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)**: En esta fase el inventario de entradas y salidas es transformado a indicadores de potenciales impactos ambientales al medio ambiente, a la salud humana y a la disponibilidad de recursos naturales[41].

- **Interpretación:** Es la fase del ACV en la que los resultados del ICV y el EICV son interpretados de acuerdo al objetivo y alcance marcados inicialmente[41].

1.3 Simplificación del ACV

Los ACV simplificados reducen la complejidad de los estudios, la simplificación debe identificar las áreas del ACV que puedan omitirse sin afectar el resultado del estudio[40].

- **Simplificación en la Evaluación de Impactos**

La simplificación en esta etapa consiste en limitar el número de categorías de impacto ambiental[40], en la fase de evaluación de impactos se emplean métodos para transformar los datos del inventario en resultados de carácter ambiental [41].

La selección de las categorías de impacto ambiental está en función de los resultados que se deseen obtener, las principales categorías de impacto contempladas por la SETAC (Sociedad de Toxicología y Química Ambiental) son: calentamiento global, consumo de recursos energéticos, reducción de la capa de ozono, eutrofización, acidificación, consumo de materias primas, formación de oxidantes fotoquímicos [41].

1.4 Metodología de las Directrices del IPCC de 2006

Para la determinación de la huella de carbono se utiliza la metodología establecida por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), Directrices del 2006 IPCC para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero [42], en donde se abordan las categorías Energía [43] [44] y Procesos Industriales y Uso de Producto (IPPU) [45].

- **Energía**

Para estimar las emisiones procedentes de la quema del combustible fósil, las directrices del IPCC 2006, plantea métodos para estimar las emisiones de $C0_2$, puesto que estas son independientes de la tecnología de combustión; mientras que las emisiones de CH_4 y N_2O dependen mucho de la tecnología; por tanto ofrece los factores de emisión por defecto para el CO_2, aplicables a todos los procesos de combustión, tanto estacionarios como móviles [43].

La determinación de estas emisiones se calculan multiplicando el consumo de combustible por el factor de emisión correspondiente, la elección del método para este estudio se basa en la metodología del Nivel 1[44], que es una estimación que requiere conocer las cantidades de combustible quemado y el factor de emisión por defecto.

- **Procesos Industriales y Uso de los Productos (IPPU)**

Esta categoría aborda las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por los procesos industriales, las principales fuentes de emisión son las descargas que transforman materias por medios químicos o físicos como la industria del cemento en donde se liberan cantidades significativas de CO_2[46].

Los gases como el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) pueden ser emitidos por algunas categorías de la industria de los minerales, sin embargo dados los conocimientos científicos actuales, se supone que estas emisiones son insignificantes y por tanto no son abordadas en esta categoría [45].

La metodología estima las emisiones relacionadas únicamente en el proceso de producción; el cual establece las emisiones procedentes de la calcinación de materiales carbonatados poniendo énfasis en tres categorías: producción de cemento, de cal y de vidrio[45].

Según establece las Directrices del IPCC, en la fabricación del cemento, *"el CO2 se genera durante la producción de clínker"*, durante su fabricación puede generarse polvo de horno de cemento, CKD por sus siglas en inglés[45].

La elección del método para determinar estas emisiones se basa en el Nivel 2: "Utilización de los datos sobre producción de clínker", cuyo valor se estima en función de los datos de producción de clínker y de un factor de emisión por defecto. [45].

Dentro de la Categoría de Procesos Industriales y Utilización de Productos, se identifica con el código 2A a la Industria de los Minerales y con el código 2A1 la Producción de Cemento [46].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El enfoque de la investigación es cuantitativa, no experimental y tiene como objetivo cuantificar el desempeño ambiental de una planta de cemento en Ecuador, a través de la aplicación del marco metodológico del Análisis de Ciclo de Vida [38], [39], [40] [27]; además de la metodología establecida por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) - Directrices del 2006 [42], [43] [44] (IPPU) [45].

Para la obtención de dichos resultados se analiza las categorías de calentamiento global y consumo de recursos energéticos. Dentro de la categoría de calentamiento global se cuantifica únicamente el dióxido de carbono.

2.1 CASO DE ESTUDIO

El análisis se realiza en una planta cementera en la Región Sur del país, en la cual se produce cemento portland puzolánico tipo IP, que mantiene la certificación de conformidad a la norma NTE INEN 490: 2011, tipo de cemento que se clasifica dentro del cemento hidráulico para uso en hormigón para construcción en general [47]. Los datos analizados corresponden a 1 año de producción (año 2016), en los cuales se han considerado reportes mensuales registrados desde el 01 de Enero al 31 de Diciembre de 2016.

La aplicación de la metodología del ACV en el proceso de producción del cemento, permite emplear un método ampliado con un enfoque integral que garantiza la exhaustividad de una evaluación ambiental del producto[26], en una fábrica de la ciudad, el mismo que se describe en las siguientes fases:

Definición de Objetivo y Alcance:

Objetivo: Determinar la energía contenida y las emisiones de $C0_2$ en el proceso de fabricación del Cemento.

Alcance: El límite del sistema empleado en esta investigación es de "puerta a puerta", que abarca el proceso de producción dentro de la fábrica, siendo aquel que considera las entradas y salidas del sistema productivo.

Unidad Funcional

La unidad funcional de este estudio es 1 tonelada de cemento [27], en cuanto a la categoría de impacto ambiental – consumo de recursos energéticos la unidad de referencia es MJ [41], por tanto su unidad se expresará como MJ/t; en cuanto a las emisiones de CO_2 que están dentro de la categoría calentamiento global la unidad de referencia es $KgCO_2/t$.

Diagrama de Flujo

El proceso de producción del cemento se desarrolla en las siguientes fases: trituración, pre-homogenización, molino de crudo, homogenización del crudo, clinkerización, molienda de cemento y despacho de cemento.

El diagrama de flujo del proceso se muestra en la figura 3, el mismo que permite explicar su funcionamiento; la planta de producción se divide en dos subsistemas el primero se refiere a la producción de clínker y el segundo a la producción de cemento, en los cuales se especifican los datos de entradas y salidas del sistema. Se considera esta estructuración pues es una forma de presentación de los inventarios de Simapro [30].

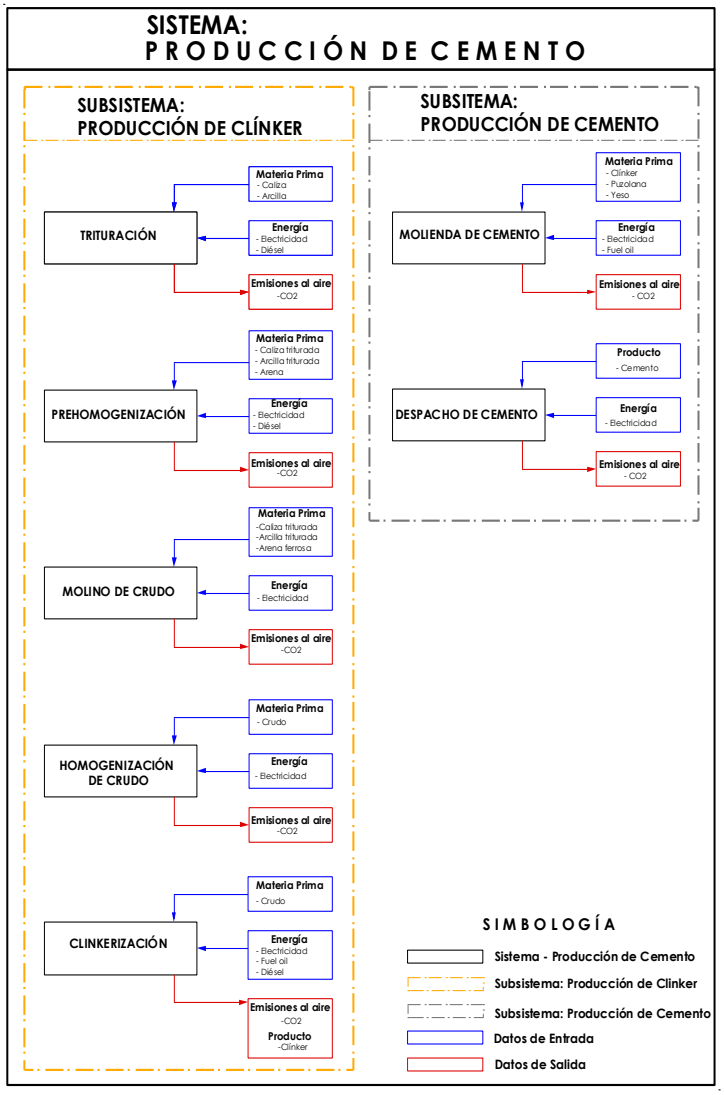


Figura 3. Flujos de entrada y de salida del sistema

Desarrollo del Inventario de Ciclo de Vida

Para el desarrollo del inventario se han recopilado los reportes mensuales de producción de la planta cementera, en donde se han cuantificado los datos de entrada y salida de cada uno de los procesos unitarios.

El llenado de las fichas del inventario se basó en el modelo del Ejemplo de Hojas de Recopilación de Datos - Ejemplo de Hoja de Datos de Procesos Unitarios (Anexo 1) de la Norma NTE INEN – ISO 14044 [39]; así como también en el modelo de fichas de los Inventarios de Simapro (Anexo 2) [30]; los mismos que fueron adaptados para el levantamiento del inventario de esta investigación (Anexo 3).

La estructuración de los datos se subdivide en:

Producción de Clínker

Durante el proceso de producción del clínker, se calcina la piedra caliza, compuesta esencialmente de carbonato de calcio ($CaCO_3$), para producir cal (CaO) y liberar CO_2[45].

Los procesos que intervienen en la producción del Clínker son:

- **Trituración:** El material ingresa en el triturador primario para la fragmentación de las rocas calizas, las mismas que son dosificadas por el laboratorio de control de calidad en función de sus características.

- **Prehomogenización:** Proceso semiautomático que realiza el apilamiento de la caliza triturada para luego ser transportada hasta las tolvas de dosificación del molino de crudo.

- **Molino de crudo:** La caliza obtenida en el proceso de trituración y pre-homogenización, se dosifica con calizas de alta pureza, arcilla y arena ferrosa; el molino es un circuito cerrado y para el secado de la caliza utiliza gases residuales del horno a una temperatura de 320°C, este producto es llevado a los silos de homogenización.

- **Homogenización del crudo:** La función del área es mezclar la harina cruda hasta obtener un material homogéneo para lo cual se utiliza aire comprimido. El sistema de homogenización consta de dos silos de homogenización, en los que normalmente en uno de ellos se realiza la recepción del producto de la molienda y en el otro se hace la homogenización.

- **Clinkerización:** La harina cruda es tratada hasta que llega al horno a una temperatura del material sobre los 800°C, se dispone de un sistema automático de control; se pretende estabilizar una producción uniforme del horno, que la temperatura no sea menor a 1.450°C.

Datos de entrada:

Consumo de materias primas: La caliza proviene de distintos lugares del país, de canteras ubicadas en la región costanera a 210 km de distancia de la planta cementera, de la región Amazónica ubicadas a 120 km de distancia y de canteras locales próximas a la fábrica; mientras que la arcilla y la arena son abastecidas por proveedores locales.

Consumo de energía: Se registra el consumo de energía eléctrica, así como el consumo de combustibles como el diesel y el fuel oil, los mismos que son transformados en unidad de energía.

El Anexo 4a contiene el levantamiento de la información en las fichas del inventario.

Cálculo de Datos de Entrada:

- **Materia Prima:** La materia prima (caliza, arcilla y arena) ha sido cuantificada en toneladas según los datos de producción proporcionados por la planta cementera, los mismos que llevan un registro mensual del ingreso de la materia prima hacia los lugares de almacenamiento dentro de la planta, siendo el reporte para el año 2016 de 556.262,74 toneladas. Durante el proceso de trituración la materia prima va perdiendo humedad lo que genera que el peso de la misma disminuya, ver Anexo 5.

Combustible: Se ha cuantificado el total del combustible utilizado en el proceso de clinkerización, los tipos de combustible son el diesel y el fuel oil, cuyos valores se han transformado en entradas de energía multiplicándolas por el calor de combustión correspondiente, según se establece en la Norma [39], ver Anexo 6a y 6b.

En la tabla 1 se identifica los valores del poder calórico tomados del Informe 2016 - Factor de emisión de CO_2 del Sistema Nacional Interconectado [48].

Tabla 1. Poder calórico de los combustibles utilizados por el sector eléctrico

Combustible	Poder Calorífico Neto (TJ/1000 t)
Fuel oil	39,2
Diésel	40,8

Fuente: PETROECUADOR [48]

- **Energía Eléctrica:** Se ha considerado el consumo en Kwh de energía eléctrica, en cada uno de los procesos unitarios que corresponde a las áreas de: trituración, prehomogenización, molino de crudo, homogenización del crudo y clinkerización, datos proporcionados por la planta de producción que registran el consumo por proceso, consumo de energía que ha sido transformado a MJ.

El anexo 7 muestra, la cantidad total de energía consumida en el sistema.

Datos de Salida:

Producto: El clínker

Emisiones de $C0_2$: Se estima las emisiones procedentes de la producción de clínker [45] y las emisiones procedentes de la quema de los combustible fósiles [44].

Cálculo de Datos de Salida:

- **Materia Prima:** Se cuantifica la cantidad de clínker producido en toneladas durante el año de producción.

- **Emisiones de $C0_2$**

  - **Durante la producción de clínker:**

Se han estimado las emisiones de $C0_2$ durante la producción del clínker, proceso que se conoce como calcinación de la caliza, a través de la adopción de la metodología que establece las Directrices del IPCC - Emisiones de la industria de los minerales, con la aplicación del Método del Nivel 2, el cual considera

como buena práctica utilizar datos sobre su producción y su contenido de CaO [45], determinado a través de la ecuación (1).

Emisiones $C0_2$= Mcl x EF cl x CF ckd (1)

Donde:

Emisiones de CO_2 = emisiones de CO_2 proveniente de la producción de cemento, toneladas

Mcl = masa de la cal producida, toneladas

EFcl = factor de emisión para el clínker, toneladas de CO_2/toneladas de clínker

CFckd = factor corrector de las emisiones para el CKD, sin dimensión

Para la elección del factor de emisión para el clínker (EFcl), se usa el Método del Nivel 2, considerando el factor de emisión de base 0.51 y el porcentaje de contenido de CaO en el clínker [45].

El factor corrector de las emisiones para el polvo de horno de cemento (CFckd) es 1, pues se estima que no hay pérdidas de CKD calcinado en el sistema [45]. Ver cálculos en Anexo 8.

- **Consumo de Combustibles:**

Para determinar las emisiones de C02 por el uso de los combustibles diesel y fuel oil, se utiliza la metodología que estable las Directrices del IPCC – Combustión Estacionaria, aplicando el método del nivel 1[44], a través de la siguiente ecuación (2):

Emisiones $_{\text{GEI combustible}}$ *= Consumo de combustible x Factor de emisión* $_{GEI,\ combustible}$ (2)

Donde:

Emisiones $_{\text{GEI combustible}}$ = emisiones de un gas de efecto invernadero dado por tipo de combustible (kg GEI)

Consumo combustible = cantidad de combustible quemado (TJ)

Factor de emisión GEI, combustible = factor de emisión por defecto de un gas de efecto invernadero dado por tipo de combustible (kg gas/TJ). Para el caso del CO_2, incluye el factor de oxidación del carbono, que se supone es 1.

Los valores de los factores de emisión de CO_2 de los combustibles utilizados que se indican en la tabla 2, se tomaron del Informe 2016 - Factor de emisión de CO_2 del Sistema Nacional Interconectado [48], ver cálculos en Anexo 9.

- Tabla 2. Factor de Emisión de CO_2 por defecto para la combustión

Combustible	FE (Kg $C0_2$/TJ)
Fuel oil	75.500
Diesel	72.600

Fuente: IPCC[48]

- **Consumo de Energía Eléctrica:**

El método de estimación más común para cuantificar las emisiones resulta de la ecuación (3) [42].

- Emisiones = AD x Ef (3)

Donde:

AD = Datos de la actividad

Ef = Factor de emisión

Para determinar las emisiones de $C0_2$ generadas por el consumo de energía eléctrica se considera el total de energía consumida y se multiplica por el factor de emisión establecido en el Informe 2016 - Factor de emisión de CO_2 del Sistema Nacional Interconectado [48], cuyo valor es de $\mathbf{0{,}6635}$ $[\boldsymbol{tCO_2/MWh}]$ $\boldsymbol{eq}$, ver cálculos en Anexo 9.

Producción de Cemento

Los procesos que intervienen en la producción de cemento son:

- **Molienda de cemento:** Inicia con la alimentación de sus componentes: clínker, puzolana y yeso.

  La dosificación se realiza de acuerdo a la disposición del laboratorio de control de calidad, el producto es almacenado temporalmente en un silo y luego se procede a poner en funcionamiento el molino.

- **Despacho de cemento:** El despacho de cemento se realiza mayoritariamente en fundas de 50 kg (84%) el estibado se realiza manualmente.

El anexo 4b contiene el levantamiento de la información en las fichas del inventario.

Datos de entrada:

Consumo de materias primas: Clínker, puzolana y yeso.

Consumo de energía: Se registra el consumo de energía eléctrica, así como el consumo de fuel oil, combustible que es transformado en unidad de energía.

Datos de Salida:

Producto: El cemento.

Emisiones de $C0_2$: Se estima las emisiones de $C0_2$, procedentes de la quema de los combustible fósiles [44].

Cálculo de Datos de Entrada:

- **Materias primas**: Se cuantifica en toneladas la materia prima (clínker, puzolana y yeso), según los datos de producción de la planta cementera, ver Anexo 5.

- **Combustible:** Para el cálculo del fuel oil, como entrada de energía se multiplica su consumo por el calor de combustión correspondiente, según se establece en la Norma NTE INEN – ISO 14044 [39], el valor del poder calórico se detalla en la Tabla 1, los cálculos se detallan en el Anexo 10.

- **Energía eléctrica:** Se registra el consumo de energía eléctrica en Kwh, de los procesos unitarios correspondientes a molienda de cemento y despacho de cemento, consumo que se cuantifica en MJ, ver Anexo 7.

Cálculo de Datos de Salidas:

- **Materia Prima:** Se cuantifica la cantidad de cemento producido en toneladas durante el año de producción.

- **Emisiones de CO_2**

  Consumo de combustibles: Las emisiones de $C0_2$ se calcularon de acuerdo a la ecuación (2), ver cálculos en Anexo 11.

  Consumo de energía eléctrica: Las emisiones de $C0_2$ se calcularon de acuerdo a la ecuación (3), ver cálculos en Anexo 11.

Simplificación de la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida

En esta fase se transforman los datos recopilados en el Inventario, en resultados de carácter ambiental, se analiza dos categorías de impacto ambiental correspondientes a calentamiento global y consumo de recursos energéticos.

Interpretación

En esta fase del ACV los resultados son interpretados de acuerdo al objetivo y alcance marcados inicialmente, los mismos que serán descritos en el apartado discusiones.

III. RESULTADOS

Se registra una producción anual de 457.461 toneladas de cemento y de 327.344 toneladas de clínker, la cantidad de clínker utilizada para esta producción de cemento es de 317.296 toneladas, la diferencia de clínker se considera como reserva de producción. Se determina que para 1 tonelada de cemento se requiere 0.69 toneladas de clínker.

Datos de Entradas

Consumo de Materias Primas

La tabla 3 muestra los valores del consumo de materias primas utilizados en la fabricación de 1 tonelada de cemento, en el que se considera los dos subsistemas. Se puede evidenciar que en el subsistema de producción de clínker, la caliza representa el 95,64%; mientras que en el subsistema de producción del cemento, el material influyente en su composición es el clínker representando el 66,99%, como se muestra en el Gráfico 1.

Tabla 3 Consumo de Materias primas (t) en la producción de 1 tonelada de cemento

PRODUCCIÓN DE CLIÍNKER			PRODUCCIÓN DE CEMENTO		
Caliza	Arcilla	Arena	Clínker	Puzolana	Yeso
1,16	0,046	0,0069	0,69	0,3	0,04

Fuente: Elaboración propia en base a los datos de producción

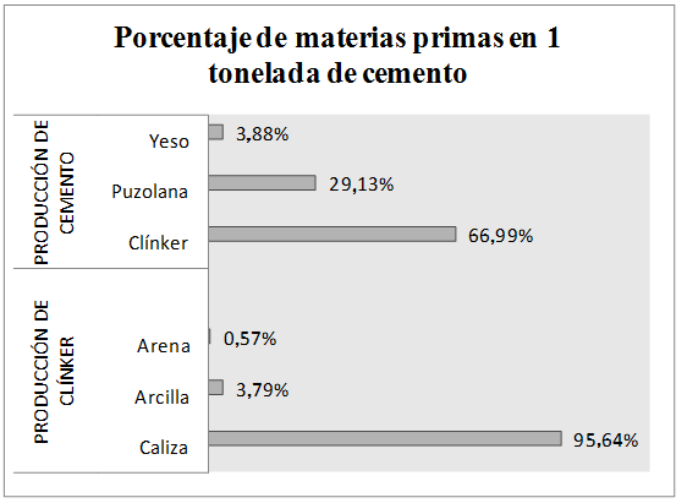


Gráfico 1. Porcentaje de materias primas en la producción de 1 t de cemento

Consumo de Energía

La energía consumida en la producción de 1 tonelada de cemento es de 3.191,64 MJ. La tabla 4 muestra los valores para cada subsistema, en cada uno de ellos se especifica el tipo de combustible y energía utilizada, esta estructuración permite establecer que el mayor consumo de energía se produce durante la etapa de producción de clínker representando el 91,44% del total de la energía consumida, mientras que en el proceso de producción de cemento la energía consumida apenas equivale al 8,56%, como se muestra en el Gráfico 2.

Tabla 4 Consumo de Energía (MJ) en la producción de 1 tonelada de cemento

PRODUCCIÓN DE CLÍNKER			PRODUCCIÓN DE CEMENTO		TOTAL
Combustibles fósiles Diésel	Fuel Oil	Energía Eléctrica	Combustibles fósiles Fuel oil	Energía Eléctrica	
18,23	2.678,3	222,04	121,56	151,51	3.191,64 MJ

Fuente: Elaboración propia en base a los datos de producción

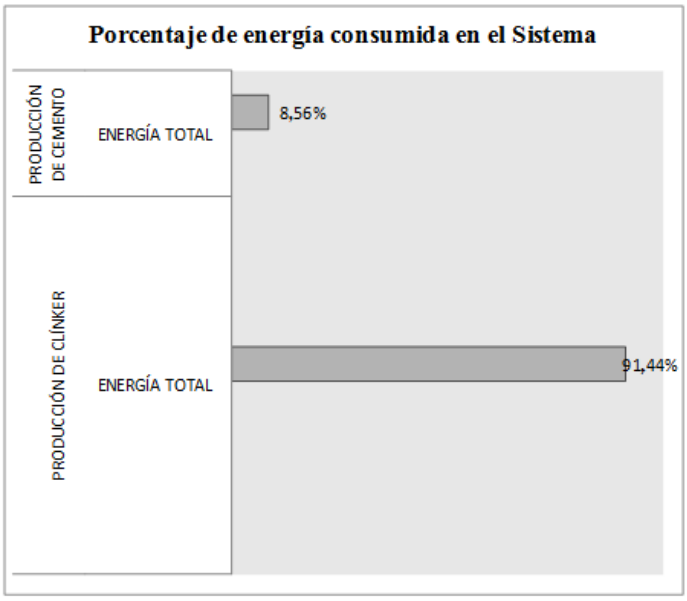


Gráfico 2. Porcentaje de energía consumida en el Sistema

En el subsistema de producción de clínker, el uso de combustibles fósiles equivale al mayor porcentaje del consumo de energía, pues representa el 92,39% del total de energía consumida, de este porcentaje el fuel oil contiene el 91,77%; mientras que la energía eléctrica representa el 7,61%.

En el subsistema de producción de cemento, el uso energía eléctrica equivale al mayor porcentaje del consumo energético, representando el 55,48%; mientras que la utilización del combustible fuel oil representa el 44,52%, como se muestra en el Gráfico 3.

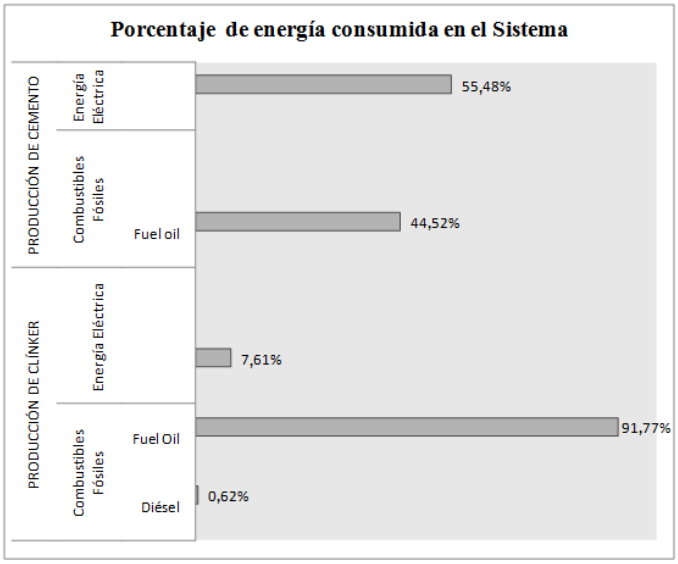


Gráfico 3. Porcentaje de energía consumida en el Sistema

Datos de Salidas

El análisis de los datos de salida cuantificados en la investigación comprende únicamente las emisiones de dióxido de carbono (CO_2).

Las emisiones han sido cuantificadas en cada uno de los subsistemas, permitiendo establecer su mayor contribución en el proceso de fabricación de clínker, atribuyendo el 92,73% de las mismas, mientras que en el proceso de producción de cemento se asocia el 7,27% de emisiones, como se muestra en el Gráfico 4.

La tabla 5 muestra la estructuración de los subsistemas y los respectivos valores de emisiones asociados al proceso de calcinación, consumo de combustibles fósiles y consumo de energía eléctrica. Permitiendo establecer el valor de 510,54 $KgCO_2$ / tonelada de cemento

Tabla 5 Emisiones de $C0_2$ (Kg CO_2) por tonelada de cemento

PRODUCCIÓN DE CLÍNKER				PRODUCCIÓN DE CEMENTO		TOTAL
Calcinación (Descarbonatación)	Combustibles fósiles Diésel	Combustibles fósiles Fuel Oil	Energía Eléctrica	Combustibles fósiles Fuel Oil	Energía Eléctrica	
228,98	1,32	202,21	40,92	9,18	27,92	510,54 Kg C02 eq

Fuente: Elaboración propia en base a los datos de producción

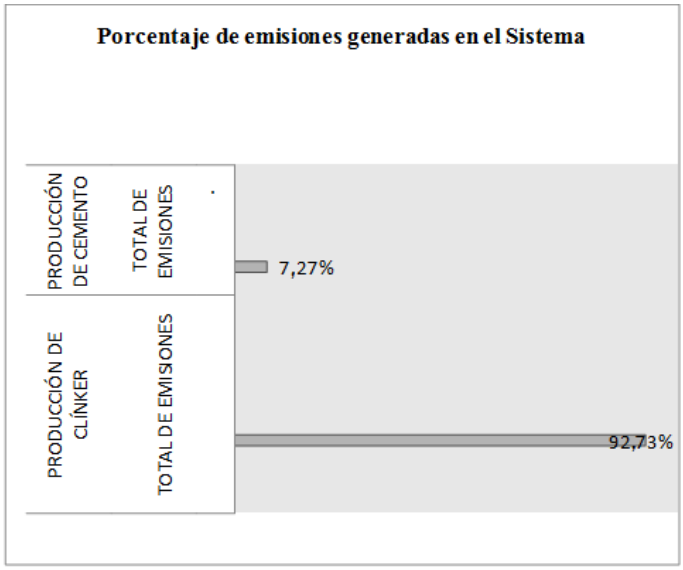


Gráfico 4. Porcentaje de emisiones generadas en el sistema

En el subsistema de producción de clínker, se evidencia que el proceso de calcinación de la caliza (descarbonatación) asocia el 48.37% de emisiones generadas en el proceso, mientras que el consumo de combustibles fósiles aporta el 42,99% de emisiones y el uso de energía eléctrica genera el 8,64%

En el subsistema de producción de cemento, se evidencia que el consumo de energía eléctrica es la que genera el mayor número de emisiones, contribuyendo con el 75,28%, mientras que el uso del combustible fuel oil aporta el 24,72% de emisiones en este proceso, como se muestra en el Gráfico 5.

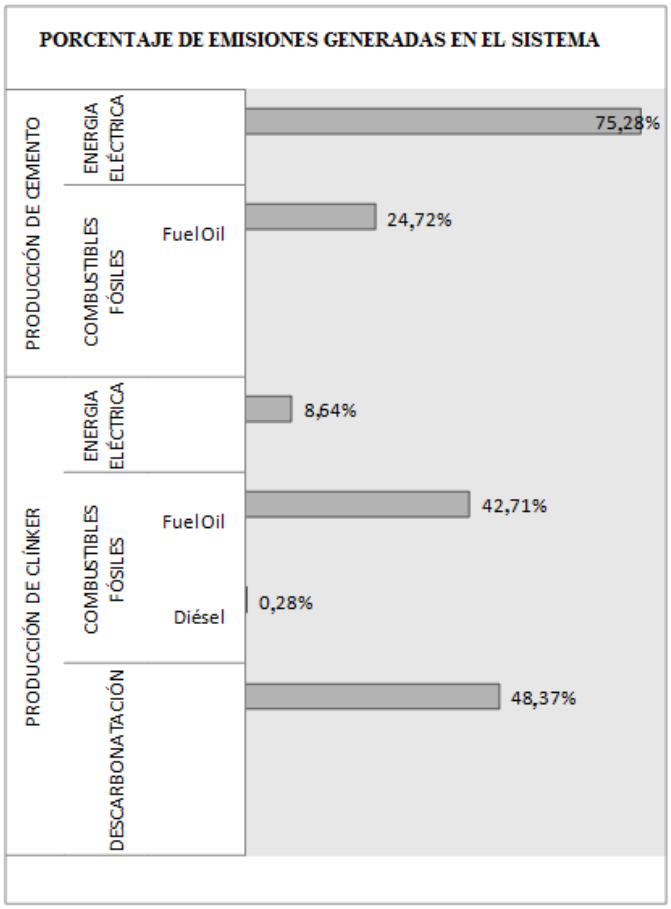


Gráfico 5.Porcentaje de emisiones generadas en el Sistema

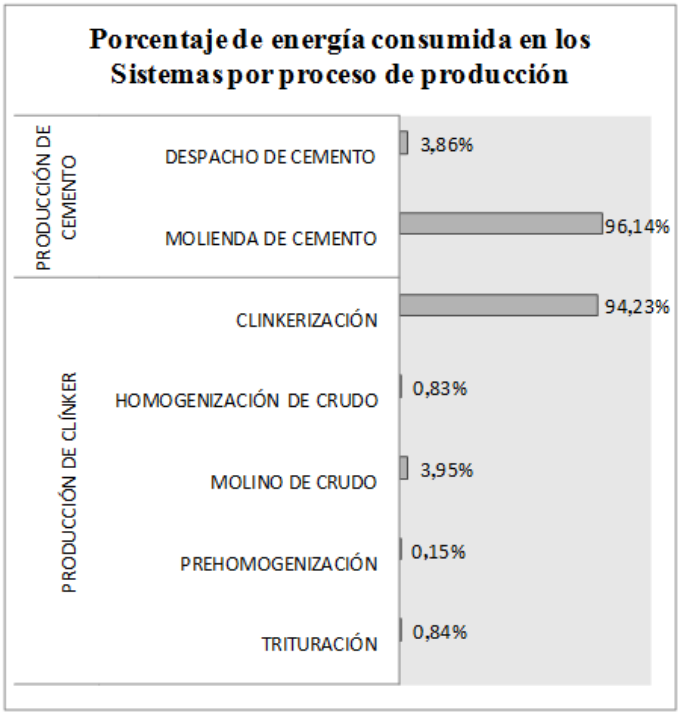


Gráfico 6.Porcentaje de energía consumida en los Sistemas por proceso de producción

IV. DISCUSIONES

A través de la aplicación de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida Simplificado, se ha podido establecer los valores referentes al consumo de energía y las emisiones de CO_2 en el proceso de fabricación del Cemento.

Los datos obtenidos de la planta cementera de 1 año de producción, han permitido determinar que 1 tonelada de cemento producido emite 510,54 Kg CO_2 y consume 3.191,64 MJ, estos valores se detallan en la Tabla 6, la cual describe las categorías de impacto contempladas en la investigación y los valores correspondientes obtenidos.

Tabla 6. Energía contenida y Emisiones de CO_2 por tonelada de cemento producido

CATEGORÍA DE IMPACTO AMBIENTAL	UNIDAD DE REFERENCIA	DATOS OBTENIDOS
Calentamiento Global	Kg CO_2 eq	**510,54** Kg CO_2/t
Consumo de Recursos Energéticos	MJ	**3.191,64** MJ/t

Fuente: Elaboración propia en base a los datos de producción

Dentro del subsistema de producción de clínker se evidencia que el proceso de clinkerización es el que mayor consumo energético genera representando el 94,23%, mientras que en el subsistema de producción de cemento el mayor consumo se registra en el proceso de molienda de cemento representando el 96.14%, como se muestra en el Gráfico 6.

El enfoque del sistema establecido en esta investigación puerta a puerta no permite establecer parámetros de comparación en igualdad de condiciones con otros estudios, ya que muchos de ellos presentan un límite del sistema diferente al de la presente investigación. Sin embargo, se presentan los datos de la Tabla 7 únicamente como valores de referencia, que forman parte de la investigación "Estudio comparativo sobre el uso de materiales de desecho en la industria del cemento - Caso de Estudio Hong Kong", en la cual se comparan datos de diferentes países [8], correspondientes a energía y emisiones. En esta tabla se puede identificar que la diferencia del valor obtenido en Ecuador y los otros países corresponde a la etapa de extracción de materia prima hasta que llega a la fábrica, lo que permite suponer que la incidencia de esta primera parte es significativa, sin embargo, sería importante contar con un estudio para obtener el dato.

Tabla 7. Datos del consumo de energía y emisiones de $C0_2$ en la producción de cemento por diferentes estudios

Estudio	Localización	Tipo de Cemento	Consumo de Energía MJ	Emisiones (KG $C0_2$ eq)	Límite del sitema
Li et al. (2015)	China	OPC	No se especifica	799	Cuna a la Puerta
Li et al. (2015)	Japon	OPC	No se especifica	779	Cuna a la Puerta
Garcia - Gusano et al (2015)	España	OPC	No se especifica	799	Cuna a la Puerta
Feiz et al. (2014)	Suiza	OPC	No se especifica	779	Cuna a la Puerta
Marceau et al. (2006)	Estados Unidos	OPC	4800	929	Cuna a la Puerta
Josa et al.(2007)	EU	OPC	No se especifica	920	Cuna a la Puerta
Chen et al. (2010a)	Francia	OPC	No se especifica	782	Cuna a la Puerta
Strazza et al (2010)	Italia	OPC	6170	769	Cuna a la Puerta
Bushi and Meli (2014)	Canada	OPC	6620	950	Cuna a la Puerta
Bushi and Meli (2014)	Canada	PLC	6020	850	Cuna a la Puerta
Huntzinger and Eatmon (2009)	Estados Unidos	OPC	No se especifica	880	Cuna a la Puerta
Crossin (2012)	Australia	OPC	No se especifica	850	Cuna a la Puerta
Uzzal Hossaina, Chi Sun Poon (2016)	Hong Kong	OPC	5732	980	Cuna a la Puerta
Uzzal Hossaina, Chi Sun Poon (2016)	Hong Kong	PFC	4790	806	Cuna a la Puerta
Esta Investigación	Ecuador	OPC	3.191,64	510,54	Puerta a Puerta

OPC Cemento Portland ordinario
PFC Cemento Portland de cenizas volantes
PLC Cemento Portland de piedra caliza

Fuente: [8]

Se considera un limitante además el no disponer de un software que permita evaluar en su totalidad los impactos ambientales generados durante el proceso de fabricación del cemento, el mismo que resultaría de gran utilidad pues se dispone de los datos necesarios para la evaluación de otros impactos.

V. CONCLUSIONES

La presente investigación aporta datos cuantitativos de energía y emisiones de CO_2 en el proceso de fabricación de cemento en el Ecuador, en donde ha determinado que 1 tonelada de cemento, consume 3.191,64 MJ de energía y genera 510,54 Kg CO2.

La estructuración del inventario en dos subsistemas: Producción de Clínker + Producción de Cemento, ha permitido realizar un análisis detallado por separado de cada uno de los procesos de producción.

En cuanto al consumo de materias primas, el material predominante para su fabricación es la caliza, representando el 51,72% de su composición química.

El consumo energético proviene del uso de combustibles fósiles (diesel y fuel oil) y de energía eléctrica suministrada por la red, evidenciándose que el mayor consumo de energía se produce en la etapa de producción de clínker, representando el 91,44% de la energía total del sistema. Este consumo de energía se debe principalmente al uso del combustible fósil fuel oil

Si bien el sistema completo, el mayor consumo energético se debe a los combustibles fósiles, la investigación muestra que en el subsistema del cemento, el mayor consumo lo registra el uso de energía eléctrica con el 55,48%frente a 44,52%de uso de combustibles fósiles.

Con respecto a las emisiones liberadas a la atmósfera, el proceso de clinkerización genera la mayor contribución, representando el 92,73% del total de emisiones, mientras que el proceso de producción del cemento asocia el 7,27% de las mismas.

Las emisiones se producen principalmente en la fabricación de clínker debido a las reacciones químicas que se originan en el proceso de calcinación de la caliza (descarbonatación) y por la quema del combustible fuel oil.

La presente investigación utilizó un método vigente en diversos estudios, [8] [33] [34] [35] [15] [36] debido a que la aplicación de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida, permite medir diversos impactos ambientales. En el caso de Ecuador, ha permitido medir el impacto de las emisiones de CO_2 dentro de la categoría calentamiento global y el impacto por consumo de recursos energéticos, datos que podrán ser almacenados en una base nacional sobre materiales de la construcción. Por tanto es importante continuar con la realización de otros estudios con alcances similares o mayores.

Adicionalmente, estos tipo de estudios pueden aportar a las fábricas a mejorar sus procesos, haciéndolos más eficientes y reduciendo los impactos ambientales generados durante su etapa de producción, a través de la aplicación de estrategias como la utilización de combustibles alternativos, el uso de energía renovable, la implementación de mejoras tecnológicas, la sustitución de la materia prima entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la Maestría en Arquitectura Bioclimática del Centro de Posgrados de la Universidad de Cuenca, por haber aportado los conocimientos necesarios para el desarrollo de esta investigación, al Proyecto “Método de certificación de la construcción sustentable de viviendas” financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC) y la Facultad de Arquitectura, por haberme permitido formar parte de su grupo de investigación.

REFRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IPCC, “Cambio Climático 2014: Informe de síntesis / Resumen para responsables de políticas,” *Cambio Climático 2001 Inf. síntesis*, pp. 2–38, 2014.

[2] M. Ambiente, W. Commission, A. General, N. Unidas, L. Comisi, N. F. Com, O. C. Future, and N. Unidas, “Nuestro Futuro Común,” 1987.

[3] J. José and O. Valencia, “en el marco de la sustentabilidad About bioclimatic architecture within the,” 2013.

[4] O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, and Y. Sokono, “Cambio climático 2014,” *Resum. para las Responsab. Polit.*, p. 33, 2014.

[5] J. Zhang, J. C. P. Cheng, and I. M. C. Lo, “Life cycle carbon footprint measurement of Portland cement and ready mix concrete for a city with local scarcity of resources like Hong Kong,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 19, no. 4, pp. 745–757, 2014.

[6] I. Zabalza Bribián, A. Valero Capilla, and A. Aranda Usón, “Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 5, pp. 1133–1140, 2011.

[7] M. P. Mercader, A. R. De Arellano, and M. Olivares, “CO 2 producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución,” vol. 64, pp. 401–414, 2012.

[8] H. Kong, U. Hossain, C. Sun, I. M. C. Lo, and J. C. P. Cheng, “Comparative LCA on using waste materials in the cement industry : A,” *"Resources, Conserv. Recycl.*, 2016.

[9] G. Wadel, J. Avellaneda, and A. Cuchí, “La sostenibilidad en la arquitectura industrializada : cerrando el ciclo de los materiales,” vol. 62, pp. 37–51, 2010.

[10] M. Suhr, G. Klein, I. Kourti, M. Rodrigo Gonzalo, G. Giner Santonja, S. Roudier, and L. Delgado Sancho, *Best Available Techniques (BAT). Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide*. 2015.

[11] W. Chen, W. Liu, Y. Geng, S. Ohnishi, L. Sun, W. Han, X. Tian, and S. Zhong, “Life cycle based emergy

analysis on China's cement production," *J. Clean. Prod.*, vol. 131, no. February 2017, pp. 272–279, 2016.
[12] C. Valderrama, R. Granados, J. L. Cortina, C. M. Gasol, M. Guillem, and A. Josa, "Implementation of best available techniques in cement manufacturing: A life-cycle assessment study," *J. Clean. Prod.*, vol. 25, pp. 60–67, 2012.
[13] R. Feiz, J. Ammenberg, L. Baas, M. Eklund, A. Helgstrand, and R. Marshall, "Improving the CO<inf>2</inf> performance of cement, part I: Utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 98, pp. 272–281, 2015.
[14] N. D. Hrvoje Mikulčić, Jiří Jaromír Klemeš, Milan Vujanović, Krzysztof Urbaniec, "Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process," *J. Clean. Prod.*, vol. 136, pp. 119–132, 2016.
[15] D. N. Huntzinger and T. D. Eatmon, "A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies," *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 7, pp. 668–675, 2009.
[16] D. Song, J. Yang, B. Chen, T. Hayat, and A. Alsaedi, "Life-cycle environmental impact analysis of a typical cement production chain," *Appl. Energy*, vol. 164, pp. 916–923, 2016.
[17] D. A. Salas, A. D. Ramirez, C. R. Rodríguez, D. M. Petroche, A. J. Boero, and J. Duque-Rivera, "Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: A literature review," *J. Clean. Prod.*, vol. 113, pp. 114–122, 2016.
[18] L. Moretti and S. Caro, "Critical analysis of the Life Cycle Assessment of the Italian cement industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 152, pp. 198–210, 2017.
[19] A. Petek Gursel, E. Masanet, A. Horvath, and A. Stadel, "Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 51, pp. 38–48, 2014.
[20] J. Herlihy, "Statistical Report 2013," *Floor Cover. Wkly.*, vol. 63, no. 14, 2014.
[21] INECYC, "Consumo de Cemento Gris per Cápita | INECYC," 2015. [Online]. Available: http://www.inecyc.org.ec/consumo-cemento-gris-per-capita/. [Accessed: 24-Aug-2017].
[22] Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, "Balance Energético Nacional 2016," p. 118, 2016.
[23] S. Eléctrica and E. Inga, "Subestación Eléctrica El Inga, provincia de Pichincha.," 2016.
[24] BANCO CENTRAL DEL ECUADOR, "Weblet Importer," 2015. [Online]. Available: https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:DRNXcUsDKE8J:https://contenido.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Catalogo/IEMensual/m1969/IEM-432.xls+&cd=2&hl=es-419&ct=clnk&gl=ec. [Accessed: 24-Aug-2017].
[25] INEC, "Encuesta de Edificaciones 2015," 2015.
[26] F. N. Stafford, A. C. Dias, L. Arroja, J. A. Labrincha, and D. Hotza, "Life cycle assessment of the production of Portland cement: A Southern Europe case study," *J. Clean. Prod.*, 2016.
[27] D. S. Márquez, D. P. Sánchez, A. D. Ramírez, D. Ph, C. R. Rodríguez, D. Ph, B. Vera, M. Sc, A. M. Palma, J. Duque-rivera, M. Sc, D. S. Márquez, D. P. Sánchez, A. D. Ramírez, D. Ph, C. R. Rodríguez, and D. Ph, "Defining Purpose and Scope for Environmental Analysis Life Cycle Cement in Ecuador Definición de Objetivo y Alcance para el Análisis de Ciclo de Vida Ambiental del Cemento en el Ecuador," pp. 0–7, 2015.
[28] F. Pinta and B. Sosa, "Análisis sectorial La Industria de la Construcción es el mayor empleador del mundo," 2012.
[29] Cembureau, "Construyendo el Futuro con Cemento y Hormigón," 2010.
[30] A. Carvalho, "Análisis del Ciclo de Vida de productos derivados del cemento," Univesridad Politécnica de Cataluña, 2001.
[31] INEN, *Cementos Hidráulicos. Requisitos de desempeño para Cementos Hidráulicos*. 2011.
[32] INEN, "Cemento Hidráulico. Definición de Términos," 2010.
[33] D. Song, J. Yang, B. Chen, T. Hayat, and A. Alsaedi, "Life-cycle environmental impact analysis of a typical cement production," *Appl. Energy*, 2015.
[34] F. N. Stafford and F. Raupp-pereira, "Life cycle assessment of the production of cement : A Brazilian case study," vol. 137, pp. 1293–1299, 2016.
[35] C. Li, Z. Nie, S. Cui, X. Gong, Z. Wang, and X. Meng, "The life cycle inventory study of cement manufacture in China," *J. Clean. Prod.*, vol. 72, pp. 204–211, 2014.
[36] C. H. Pedro Mora Peris, Marina RomayDíaz, Sonia Silvia Segovia, "El Ciclo de Vida del Cemento. Un puente a la sostenibilidad en la construcción," pp. 66–74, 2008.
[37] A. Aguado, A. Josa, and A. Cardim, "Cerámica y Vidrio para su empleo en análisis de ciclo de vida (ACV)," pp. 587–590, 2004.
[38] NTE INEN ISO 14040, "Gestión Ambiental. Evaluación del Ciclo de Vida. Principios y Estructura," 2000.
[39] NTE INEN ISO 14044, "Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices," 2014.
[40] UNE 150041 EX, "Análisis del Ciclo de Vida Simplificado," 1998.
[41] Ihobe S. A., "Análisis de ciclo de vida y Huella de Carbono," 2009.
[42] IPCC, "Introducción a las Directrices de 2006," pp. 1–13, 2006.
[43] IPCC, "Energía. Introducción," pp. 1–30, 2006.
[44] IPCC, "Combustión Estacionaria," pp. 1–47, 2006.
[45] IPCC, "Emisiones de la Industria de los Minerales," 2006.
[46] IPCC, "Procesos Industriales y Uso de los Productos. Introducción.," 2006.
[47] INEN, "Cementos Hidráulicos Compuestos. Requisitos," 2011.
[48] CENACE, "Informe 2016 Factor de Emisión de CO2 del Sistema Nacional Interconectado," 2017.

ANEXOS

Anexo 1. Ejempo de hoja de datos para procesos unitarios

Elaborado por:	Fecha:	
Identificación del proceso unitario:	Lugar objeto del informe (ubicación dentro del proceso unitario)	
Período de tiempo: año	Mes inicio:	Mes de finalización:
Descripción del proceso unitario: (adjuntar, si se requiere, hoja adicional)		

Entradas de materia	Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo	Origen
Consumo de agua [a]	Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo	Origen
Entradas de energía	Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo	Origen
Salidas de materiales (incluyendo	Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo	Origen

NOTA: Los datos en esta hoja de recopilación de datos se refiere a todas las entradas y salidas no asignadas durante el periodo especifico

a Por ejemplo, agua superficial y agua potable

b Por ejemplo, fracción de petróleo pesada, fracción de petróleo ligera, keroseno, gasolina, gas natural, propano, carbón, biomasa, red eléctrica

Anexo 2. Formato de ficha Simapro 4.0 - Pre Consultants, 1997

Sistema	Producción de cemento		
Composición	Subsistema de producción de clinker + subsistema de producción de cemento		
Origen	Inventario del Simapro	País: Holanda	
Nomenclatura original	Cement Portland I		
Hoja			
Fuente	SimaPro - Pré Consultants, 1997)		Hoja

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			**Subsistema: Producción de CLINKER**		
Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 0.94 kg de clínker)	Cantidad de material (kg)	Contribución %	Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de material (kg)	Contribución %

Subsistema: Producción de CLINKER			**Subsistema: Producción de CLINKER**		
Entrada (energías) (con respecto a la producción de 0.94 kg de clínker)	Cantidad de material (MJ)	Contribución %	Entrada (energía) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de material (MJ)	Contribución %

Anexo 3. Formato de ficha empleada en la investigación

Elaborado por:		**Fecha:**	
Identificación del proceso unitario:		**Subsistema: Producción de Clinker**	
Periodo de tiempo:		**Mes de Inicio:**	**Mes de finalización:**
ENTRADAS DE MATERIA	**UNIDAD**	**CANTIDAD**	**OBSERVACIONES**
	TOTAL		
SALIDA DE MATERIA	**UNIDAD**	**CANTIDAD**	**OBSERVACIONES**
	TOTAL		
ENTRADAS DE ENERGÍA	**UNIDAD**	**CANTIDAD**	**OBSERVACIONES**
	TOTAL		

Anexo 4a. SUBSISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CLÍNKER

Entradas y salidas de materia prima y energía

Elaborado por:	Ana León	**Fecha:**	
Identificación del proceso unitario:	***AREA B - Trituración**	**Subsistema:**	**Producción de Clinker**
Periodo de tiempo:	1 año (2016)	**Mes de Inicio:**	Enero **Mes de finalización:** Diciembre

ENTRADAS DE MATERIA	UNIDAD	CANTIDAD	OBSERVACIONES
	TOTAL	0.00	

SALIDA DE MATERIA	UNIDAD	CANTIDAD	OBSERVACIONES
	TOTAL	0.00	

ENTRADAS DE ENERGÍA	UNIDAD	CANTIDAD	OBSERVACIONES

*Para cada proceso: AREA C - Prehomogenización
AREA D - Molino de Crudo
AREA E - Homogenización de Crudo
AREA F - Clinkerización

Anexo 4b. SUBSISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO

Entradas y salidas de materia prima y energía

Elaborado por:	Ana León	**Fecha:**	
Identificación del proceso unitario:	***AREA G - Molienda de Cemento**	**Subsistema:**	**Producción de Cemento**
Periodo de tiempo:	1 año (2016)	**Mes de Inicio:**	Enero Mes de finalización: Diciembre

ENTRADAS DE MATERIA	UNIDAD	CANTIDAD	OBSERVACIONES
	TOTAL	0.00	

SALIDAS DE MATERIA	UNIDAD	CANTIDAD	OBSERVACIONES
	TOTAL	0.00	

ENTRADAS DE ENERGÍA	UNIDAD	CANTIDAD	OBSERVACIONES

*Para cada proceso: **AREA H - Despacho de Cemento**

Anexo 5. SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO

Cantidades totales de materia prima

SISTEMA:	PRODUCCIÓN DE CEMENTO
COMPOSISICIÓN:	SUBSISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CLINKER + SUSBSISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO
TIPO	CEMENTO PORTLAND
PAIS	ECUADOR

SUBSITEMA: PRODUCCIÓN DE CLINKER			**SUBSITEMA: PRODUCCIÓN DE CEMENTO**		
ENTRADA DE MATERIA	**UNIDAD**	**CANTIDAD**	**ENTRADA DE MATERIA**	**UNIDAD**	**CANTIDAD**
	TOTAL	**0.00**		**TOTAL**	**0**
SALIDA DE MATERIA	**UNIDAD**	**CANTIDAD**	**SALIDA DE MATERIA**	**UNIDAD**	**CANTIDAD**
	TOTAL			**TOTAL**	

Anexo 6a. **CÁLCULO DE ENERGÍA**
Anexo 6b.
Anexo 10 .

Combustible: Diésel y Fuel Oil

Factores de conversión de unidades básicas y derivadas

Magnitud	Unidad	Factor	Unidad S.I
Volumen	Galón	0.003785	m3

Guía metodólogía de conversión de unidades - Sien

Cantidad en m3 = Cantidad en galones x factor de conversión

1 metro cubico =	**1,000**	**Litros**

Guía metodólogía de conversión de unidades - Sien

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

Masa = Densidad del Combustible x Volumen

Toneladas = Masa en Kilogramos / 1.000

Conversión a entrada de energía

Según NTE INEN - ISO 14044	El combustible se transforma en entrada de energía multiplicando por el calor de combustión

Tabla 1. Poder calórico de los combustibles utilizados por el sector eléctrico

Combustible	**Poder Calorífico Neto (TJ/1000 ton)**
Fuel oil	39.2
Diésel	40.8

Fuente: PETROECUADOR

Anexo 7. SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO

Cantidad Total de Energía

SUBSITEMA: PRODUCCIÓN DE CLINKER			SUBSITEMA: PRODUCCIÓN DE CEMENTO		
ENTRADA DE ENERGIA	**UNIDAD**	**CANTIDAD**	**ENTRADA DE ENERGIA**	**UNIDAD**	**CANTIDAD**
Energía Eléctrica	KWH		Energía Eléctrica	KWH	
Diesel	GALON		Fuel oil	GALON	
Fuel Oil	GALON				

ENTRADAS DE ENERGÍA CONVERTIDA A MJ

SUBSITEMA: PRODUCCIÓN DE CLINKER			SUBSITEMA: PRODUCCIÓN DE CEMENTO		
ENTRADA DE ENERGIA	**UNIDAD**	**CANTIDAD**	**ENTRADA DE ENERGIA**	**UNIDAD**	
Energía Eléctrica	MJ	0	Energía Eléctrica	MJ	
Diesel	MJ		Fuel oil	MJ	
Fuel Oil	MJ				

Anexo 8. CÁLCULO DE EMISIONES

Subsistema de Producción de Clínker

Emisiones de CO2 en la producción de Clinker

Emisiones de CO2 = Mcl x EFcl x CFckd

Mcl	=	Peso (masa) de cal producida, ton
Efcl	=	Factor de emisión para el clinker, ton CO2/ton clinker
CFckd	=	Factor corrector de las emisiones para el Ckd

Anexo 9. CÁLCULO DE EMISIONES
Anexo 11.

Emisiones de gases de efecto invernadero procedente de la combustión estacionaria

Emisiones de gases = Consumo combustible x Factor emisión

Combustible	**FE (Kg C02/TJ)**	**FE (tCO2/TJ)**
Fuel oil	75,500	75.5
Diesel	72,600	72.6

Fuente: IPCC

ENERGÍA ELÉCTRICA

Factor de emisión de CO2 del Sistema Nacional Interconectado año 2016 = 0,6635