



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Desempeño Ambiental del Cemento y del Concreto en el
Ecuador: Una puerta a la Construcción Sostenible”**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL

Presentada por:

Daniel Marx Petroche Sánchez

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2021

AGRADECIMIENTO

A Dios todo poderoso, que siempre guía mis investigaciones.

Al equipo de Sostenibilidad ESPOL y del Centro de Innovación HOLCIM, quienes son un eje importante en el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Ángel Ramírez, por ser mi mentor y enseñarme la importancia del compromiso y el esfuerzo.

DEDICATORIA

Dedicado a mi esposa
Stefany, mis Padres
Daniel y Beatriz, mi
hermana Samantha y a
la sociedad ecuatoriana
en búsqueda de la
sostenibilidad.

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

**Ángel Ramírez M., Ph.D.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE**

**Ángel Ramírez M., Ph.D.
DIRECTOR DE PROYECTO**

**Mario Patiño A., M.Sc.
VOCAL**

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Titulación, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

Daniel Marx Petroche Sánchez

RESUMEN

El concreto es el material más utilizado en la industria de la construcción y el segundo más utilizado por el hombre después del agua, siendo el cemento el principal componente del concreto. La industria del cemento emite del 5-7% del total de gases de efecto invernadero en el mundo, los gases de efecto invernadero son los principales responsables del cambio climático, determinar el impacto ambiental de esta industria es urgente, con lo expuesto, se realiza un análisis de ciclo de vida a la línea de productos cementicios en el Ecuador para que sean base para el cálculo y diseño de edificaciones con un menor impacto ambiental migrando a una construcción sostenible.

El presente estudio busca realizar un análisis de ciclo de vida la cadena de suministros de la industria de cemento y concreto en el Ecuador, identificar consumos de materiales, combustibles y procesos críticos de mayor contribución en las diferentes categorías de impacto. Este estudio se lo realiza geográficamente Ecuador, con un inventario de 62.8% de la producción nacional, con un levantamiento de datos correspondientes al año 2019, considerando 3 fases: producción de clinker, producción de cemento y producción de concreto. Se valida el inventario de emisiones al aire, comparando factores de emisión del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) para CO₂ y de la European Environment Agency (EEA) para NO_x, SO₂, PM y VOC contra la emisión de la sustancia obtenida mediante la medición continua de emisiones dividida para su unidad de producción.

Se utiliza los lineamientos de ISO 14040-14044, Análisis de Ciclo de Vida, la metodología ReCiPe Midpoint (H) V1.13 con ocho de sus categorías de impacto de ciclo de vida para determinar el desempeño ambiental del clinker, cemento y concreto, siendo una de las categorías más relevantes cambio climático - GWP100. Análisis que determinó que el clinker posee un GWP100 de 897.04 kg CO₂-Eq/ton de clinker, los cementos hidráulicos compuestos Tipo GU, HE y MH, elaborados bajo la normativa ASTM C1157, poseen un GWP100 de 545.78 kg CO₂-Eq/ton de cemento GU, 696.81 kg CO₂-Eq/ton de cemento HE y 465.89 kg CO₂-Eq/ton de cemento MH. Finalizando el alcance del estudio con el concreto premezclado, que posee resistencias a la compresión entre 2.5 a 80 MPa, los resultados de GWP varían entre 126.02 a 442.14 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
 CAPÍTULO 1	
1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. Cambio Climático y la construcción	1
1.2. El concreto en la industria de la construcción	1
1.3. Cemento y sus implicaciones ambientales	2
1.4. Construcción en el Ecuador.....	3
1.5. Objetivos	4
1.5.1. Objetivo General	4
1.5.2. Objetivos Específicos	4
1.6. Justificación.....	4
1.7. Estructura del proyecto.....	4
 CAPÍTULO 2	
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Proceso de fabricación del Cemento	6
2.1.1. Extracción de Materias Primas	6
2.1.2. Preparación de Crudo	6
2.1.3. Producción de Clinker	7
2.1.4. Molienda de Cemento	7
2.1.5. Despacho	7
2.2. Clasificación de los cementos	8
2.3. Proceso de fabricación del concreto premezclado.....	10
2.3.1. Recepción y almacenamiento de Agregados.....	10
2.3.2. Recepción y almacenamiento de Cemento	11
2.3.3. Dosificación y mezclado	11
2.3.4. Carga y distribución del concreto formulado.....	11
2.3.5. Proceso de Reciclaje.....	12
2.4. Clasificación de concretos premezclados	12
2.5. Revisión bibliográfica de análisis de ciclo de vida clinker y cemento .	13
2.6. Revisión bibliográfica de análisis de ciclo de vida del concreto	17
 CAPÍTULO 3	
3. MARCO METODOLÓGICO	22
3.1. Inventario de Emisiones: Comparación entre Emisiones por Factor de Emisión vs. Monitoreo continuo de emisiones en la fuente.....	22

3.1.1. Dióxido de carbono (CO ₂)	23
3.1.2. Óxidos de Nitrógeno (NO _x), Dióxido de Azufre (SO ₂), Material Particulado (PM) y Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC).....	24
3.1.3. Sistema de medición en la fuente.....	24
3.2. Análisis de Ciclo de Vida	26
3.2.1. Alcance	27
3.2.2. Construcción de análisis de inventario	29
3.2.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida	34
3.2.4. OpenLCA	37
CAPÍTULO 4	
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. Comparación entre Emisiones por Factor de Emisión vs. Monitoreo continuo de emisiones en la fuente	38
4.2. Inventarios creados para el sistema	40
4.3. Caracterización de indicadores de impacto ambiental del Clinker en el Ecuador	48
4.4. Caracterización de indicadores de impacto ambiental del Cemento en Ecuador.....	51
4.5. Caracterización de indicadores de impacto ambiental del Concreto en Ecuador.....	54
CAPÍTULO 5	
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
5.1. Conclusiones.....	60
5.2. Recomendaciones.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	63

ABREVIATURAS

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
CEM	Cemento
PC	Cemento Portland
OPC	Cemento Portland Ordinario
RMX	Concreto Premezclado (Ready-Mixed Concrete)
ISO	Organización Internacional de Normalización
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
CEMBUREAU	The European Cement Association
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
CSI	Cement Sustainability Initiative
IEA	International Energy Agency
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos (Ecuador)
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización (Ecuador)
SCM	Materiales cementicios suplementarios
PIB	Producto Interno Bruto
CLM	Instituto de Ciencias Ambientales
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
EEA	European Environment Agency
EPA	United States Environmental Protection Agency
FICEM	Federación Interamericana del Cemento
EPD	Declaración Ambiental de Producto
PM	Material Particulado
CFC	Clorofluorocarbonos
HCFC	Hidroclorofluorocarburos
FE	Factor de emisión
GWP100	Climate change
TAP100	Terrestrial acidification
FEP	Freshwater eutrophication
MEP	Marine eutrophication
ODPinf	Ozone depletion
POFP	Photochemical oxidant formation
PMFP	Particulate matter formation
FDP	Fossil depletion
RoW	Rest of the World
GLO	Global
CO	Colombia
EC	Ecuador
PE	Perú
EMR	Monitoreo y Reporte de Emisiones

SIMBOLOGÍA

kg	Kilogramos
m ³	Metros cúbicos
m	Metros
cm	Centímetros
W	Watts
t	Toneladas
ton	Toneladas
kWh	Kilowatt hora
MJ	Mega joule
GJ	Giga joule
Nm ³	Metros cúbicos normalizados
m ³ _{N,dry}	Metros cúbicos normalizados
Gal	Galones
°C	Grados Centígrados
MPa	Mega Pascales
t*km	Toneladas kilómetro
mg	Miligramos
µg	Microgramos
ppm	Partes por millón
US\$	Dólares americanos
m	Millones
Eq	Equivalentes
CO ₂	Dióxido de carbono
NO _x	Óxidos de nitrógeno
SO ₂	Dióxido de azufre
VOC	Compuestos orgánicos volátiles
P	Fósforo
N	Nitrógeno
Ḃ	Flujo de cantidad específica, gases de escape
q	Consumo específico de energía térmica
E	Emisión
C	Concentración
η	Eficiencia

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 2.1	Esquema de Fabricación de Cemento	7
Figura 2.3	Proceso de Fabricación de Concreto premezclado	10
Figura 2.4	Recicladora de materias primas del lavado	12
Figura 3.1	Sensibilidad de los métodos de estimación de emisiones	22
Figura 3.2	Marco de Evaluación de Ciclo de Vida - ISO 14040	26
Figura 3.3	Límites del sistema y alcance de procesos de fabricación de clinker, cemento y concreto.....	28
Figura 4.1	Comparación entre Metodología de Factores de Emisión y Metodología de emisiones medidas en la fuente por unidad funcional (Ton de clinker).....	39
Figura 4.2	Diagrama de Sankey de la producción de clinker y cemento en el Ecuador.....	42
Figura 4.3	Distribución geográfica del volumen de concreto premezclado en el Ecuador.....	43
Figura 4.4	Distribución de diseños de mezcla de acuerdo a su planta de origen y volumen total de producción en el Ecuador	44
Figura 4.5	Análisis de contribución de indicadores de impacto ambiental por proceso de Clinker en el Ecuador	49
Figura 4.6	Comparación de resultados de indicador de impacto ambiental de clinker otros resultados	50
Figura 4.7	Análisis de contribución por proceso del cemento en el Ecuador	53
Figura 4.8	Análisis de contribución por proceso del concreto RMX en el Ecuador	57
Figura 4.9	Comparación de GWP de los resultados de este estudio con la literatura investigada.	59

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Normativas de fabricación de cemento	8
Tabla 2	Clasificación de cementos de acuerdo con la normativa ASTM C150	8
Tabla 3	Clasificación de cementos de acuerdo con la normativa ASTM C595	9
Tabla 4	Clasificación de cementos de acuerdo con la normativa ASTM C1157	9
Tabla 5	Clasificación de cementos de acuerdo con la normativa UNE-EN 197-1	9
Tabla 6	Metodologías seleccionadas en estudios de ACV de producción de cemento.....	14
Tabla 7	Ejemplos de evaluación de impacto de ciclo de vida de cementos en la literatura. ^a	15
Tabla 8	Metodologías seleccionadas en estudios de ACV de producción de concreto.....	18
Tabla 9	Ejemplos de evaluación de impacto de ciclo de vida de concretos en la literatura. ^d	19
Tabla 10	Factores de emisión del European Environment Agency para la producción de cemento	24
Tabla 11	Parámetros ambientales monitoreados en la fuente	25
Tabla 12	Alcance de productos acorde a normativa EN 15804.....	27
Tabla 13	Resumen de procesos tomados de la base de datos Ecoinvent para la elaboración de clinker en el Ecuador	29
Tabla 14	Resumen de procesos tomados de la base de datos Ecoinvent para la elaboración de cemento en el Ecuador.....	31
Tabla 15	Resumen de procesos tomados de la base de datos Ecoinvent para la elaboración de concreto RMX en Ecuador.	32
Tabla 16	Flujos del sistema fabricación de clinker para la unidad funcional (1 ton de clinker)	40
Tabla 17	Distancias entre plantas analizadas en este estudio con fábricas de proveedores, inventario de fábrica de concreto premezclado y energías utilizadas para la unidad funcional (1 m ³).....	46
Tabla 18	Inventario de sistema fabricación de 1 m ³ de concreto premezclado	47
Tabla 19	Resultado de categorías de impacto de evaluación de ciclo de vida para 1 ton de clinker	48
Tabla 20	Resultado de categorías de impacto de evaluación de ciclo de vida para 1 ton de cemento hidráulico compuesto	51
Tabla 21	Resultado de categorías de impacto de evaluación de ciclo de vida para 1 m ³ de concreto premezclado con diferente resistencia a la compresión.....	56

INTRODUCCIÓN

Desarrollo sostenible se define como la mejora en la calidad de vida que otorga a las personas la oportunidad de vivir en un medio ambiente saludable con mejores condiciones sociales, económicas y ambientales para las generaciones presentes y futuras (Brundtland, 1987). Mejorar la gestión de los recursos naturales es uno de los principales desafíos de la sostenibilidad en los años venideros (Habert et al., 2010).

El crecimiento de la población va en incremento, se espera que aumente un 22% para el 2050 a nivel mundial, de 7.6 a 9.7 billones de personas (United Nations, 2019), lo cual conlleva a la migración, urbanización y construcción de mega ciudades, aproximadamente 2.5 billones de personas vivirán en ciudades en el 2050 (United Nations, 2018), el aumento de la demanda de mejores condiciones de vida aumenta la necesidad de mejor y más eficiente infraestructura. De ahí que la industria de la construcción tenga que crecer exponencialmente con la demanda de nueva infraestructura. Como resultado, el consumo de materias primas también aumentaría, lo que provocaría más emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fueron establecidos por la ONU para el período 2015-2030. Los ODS se componen de 17 objetivos y 169 metas, que abordan las dimensiones social, económica y ambiental del desarrollo (United Nations, 2015). El objetivo 9 de los ODS se basa en la industria, la innovación y la infraestructura, que también exige una infraestructura sólida y resistente mediante la modernización de la existente y la construcción de una nueva en los países en desarrollo y menos desarrollados. El objetivo 13 de los ODS: Acción por el clima, consiste en adoptar medidas para combatir el cambio climático y sus efectos, tales como el aumento de 1°C de calentamiento global por encima de los niveles preindustriales, 20 cm de aumento de mar promedio desde 1880, para el 2100 se estima aumento de 30-122 cm adicionales.

Para fortalecer el cumplimiento del ODS 13, 195 naciones firmaron el acuerdo de París, que mantiene el crecimiento de temperatura en este siglo por debajo de 2°C y proseguir con los esfuerzos para limitar dicho crecimiento en 1.5 °C con respecto a los niveles preindustriales (Paris Agreement, 2016). Para lograr esto, las misiones mundiales de CO₂ deben disminuir en un 45% entre 2010-2030 y alcanzar cero en 2050.

Las emisiones de CO₂ son el principal actor del cambio climático (Sagastume Gutiérrez et al., 2017) y los esfuerzos por frenar el Cambio Climático han ido creciendo en los últimos años, la necesidad de migrar a tecnologías limpias que permitan un desarrollo sostenible es latente, para todos los actores de nuestras sociedades. Reducir la emisión de gases de efecto invernadero en el sector de la construcción es de suma importancia, para esto se requiere cuantificar su emisión en toda su cadena de valor.

CAPÍTULO 1

1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Cambio Climático y la construcción

El cambio climático y el calentamiento global han sido un tema constante de debate en la población, razón por la cual esta se muestra más perceptiva a los impactos ambientales de las industrias, entre ellas la de la construcción, lo cual ha llevado a introducir legislaciones e incentivos para regular y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Imbabi et al., 2012; Sagastume Gutiérrez et al., 2017). Además, la industria de la construcción causa también otros impactos ambientales además de las emisiones de GEI, por ejemplo, emisiones gaseosas que impactan el potencial de acidificación o la toxicidad humana, entre otros (Salas et al., 2016).

La construcción es una de las principales industrias en la economía de los países, misma que contribuye significativamente en el aumento de su producto interno bruto (Acebo et al., 2016; Tatari & Kucukvar, 2012). La industria de la construcción es uno de los sectores más dinámicos en el crecimiento económico global, es pro-cíclica, por lo que su crecimiento conduce a la evolución de nuestras sociedades. A nivel global, la construcción tiene un rápido crecimiento, esto debido al aumento de inversiones en infraestructura, construcción, energía y transporte (Onat & Kucukvar, 2020). La tasa de crecimiento de nuevas construcciones se puede observar en países de economías emergentes y en menos magnitud en países menos desarrollados (IPCC, 2014).

Ritchie & Roser, 2020 exponen que el 10.6% de las emisiones de GEI globales corresponden al sector de la construcción, minas y canteras, textiles, manufactura de vehículos y productos de madera. Estas emisiones se liberan a la atmosfera en todo el proceso de la construcción, tanto en el transporte de materiales, la energía utilizada por la maquinaria pesada en la construcción y la fabricación de los materiales de construcción (Vieira et al., 2016; Yan et al., 2010). Los residuos generados durante la construcción o en su etapa de disposición final (demolición) representan una porción significativa de los residuos producidos por las ciudades (Petroche et al., 2015).

1.2. El concreto en la industria de la construcción

El concreto, también conocido como hormigón, es un material compuesto utilizado ampliamente en la construcción, constituido principalmente por cemento, piedra triturada, arena y agua. La combinación, proporción, número de componentes y adiciones de estas materias primas resultaran en las propiedades finales del concreto (Anderson et al., 1992). La versatilidad en su fabricación que puede ser en obra o premezclada, la facilidad para ser moldeado en diferentes formas y tamaños combinados con sus propiedades mecánicas, durabilidad, inercia química, capacidad de almacenamiento del calor y su costo lo vuelven un material clave en el sector de la construcción (Das et al., 2018; Egüez Álava et al., 2016; Mehta & Monteiro, 1993).

El concreto es el material más consumido después del agua, se produce una tonelada al año por ser humano aproximadamente (Gagg, 2014), este uso extenso hace que la evaluación y análisis de sus impactos ambientales sea fundamental, considerando la emisión de GEI y su repercusión en el cambio climático (Van Den Heede & De Belie, 2012).

La búsqueda de nuevas tecnologías de producción de concreto con bajo impacto ambiental, puntualizando en la cadena de valor de sus materias primas, es fundamental para mantener la competitividad del concreto en el futuro (Proske et al., 2013). El concreto está compuesto principalmente por cemento, quien le da sus propiedades de resistencia mecánica (Adam Neville & Aïtcin, 1998).

1.3. Cemento y sus implicaciones ambientales

De manera general, la palabra cemento puede referirse a cualquier material que puede aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compactado, razón por la cual este término puede comprender una amplia variedad de materiales cementantes. El cemento que es utilizado para la fabricación de concreto tiene la propiedad de endurecer reaccionando con el agua, razón por la cual lo conocemos como cemento hidráulico (AM Neville, 1995).

El cemento en el sector de la construcción es uno de los materiales más comercializados a nivel mundial (W. Chen et al., 2015), para el 2019 se estima que el consumo de cemento global fue de 4.08 billones de toneladas (International Cement Review, 2019) y su uso es fundamental en la fabricación de concreto, fase constructiva y mantenimiento de edificaciones (Rodrigues & Joekes, 2011; Sagastume Gutiérrez et al., 2017).

El clinker es el componente principal del cemento, está compuesto de silicatos tri y dicálcicos (alita y belita), aluminato tricálcico y aluminoferrita tetracálcica, el clinker es producido en base a la sintetización de óxido de calcio, aluminosilicatos y otros componentes, a esto lo llamamos clinkerización y se lo realiza a 1450°C mediante la hornos de combustión (Domone & Illston, 2010; S. Ghosh, 1991; Ludwig & Zhang, 2015). Este proceso químico se basa en la descomposición del carbonato de calcio en óxido de calcio, esto produce elevadas emisiones de dióxido de carbono (Galvez-Martos & Schoenberger, 2014). Otros componentes del cemento son el yeso y materiales cementicios suplementarios (SCM), estos pueden ser puzolana natural, escorias de altos hornos, humo de sílice, ceniza volante, relleno calcáreo, entre otros (Kosmatka et al., 2011).

De acuerdo con el WBCSD (2002), del 5-7% de las emisiones de CO₂ mundiales corresponden a la industria del cemento (Ameri et al., 2020; Supino et al., 2016; Wang et al., 2013), debido a calcinación de la caliza y a la combustión de combustibles fósiles, adicional para los procesos de trituración de caliza, clinker y cemento se requiere un gran suministro de electricidad, el International Energy Agency, (2018) nos dice que la producción de cemento consume el 7% de la energía industrial global, corresponde a 10.7 exajoules.

Además del CO₂, la producción de cemento genera emisiones significativas de metales pesados y monóxido de carbono, esto depende a gran medida de los combustibles utilizados para el funcionamiento de los hornos de clinkerización, la emisión de NO_x y VOC pueden generar formación fotoquímica de ozono en el aire, este al entrar en contacto las personas provocan problemas a la salud (World Health Organization, 2013) y la afectación de los ecosistemas (Van Goethem et al., 2013). En las emisiones al aire de la industria de la construcción se encuentran óxidos de nitrógeno (NO_x), amoníaco (NH₃) y dióxido de azufre (SO₂), expuestos en altas concentraciones al suelo provocan acidificación en el mismo, lo que causaría problemas en el crecimiento y desarrollo de la vegetación.

1.4. Construcción en el Ecuador

El sector de la construcción es uno de los sectores más importantes en el Ecuador, esto se debe principalmente a su capacidad de generar empleos, en el Ecuador representa el 7.5% del total de empleos adecuados para el 2019 (Banco Central del Ecuador, 2019). Esta actividad es transversal con otros sectores estratégicos de las sociedades, tales como la agricultura, industria, comercio, servicios, entre otras, ya que requieren de obras civiles para desarrollar sus actividades.

El impacto en la economía del sector de la construcción en el Ecuador se ve reflejado en su contribución en el PIB, desde el 2009 ha representado un 8.24%, para el 2014 un 9.83% y en el 2019, aunque menor, contribuye en el 8.17% ocupando el quinto lugar después de la industria de manufactura, petróleo, comercio y enseñanza-salud-servicios sociales (Banco Central del Ecuador, 2020a). Para el 2020, considerando la pandemia de COVID-19 que ha paralizado la economía y varias industrias a nivel mundial (World Bank, 2020), en el Ecuador para el segundo trimestre del 2020 la construcción ocupa el segundo lugar en el valor agregado bruto después de la industria de manufactura (Banco Central del Ecuador, 2020b) y las expectativas de los empresarios se mantienen positivas y se espera un aumento en el volumen de construcción para los meses venideros (Banco Central del Ecuador, 2020c). De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador, el 86% de las estructuras construidas en el 2019 fueron de hormigón armado, siendo en menor proporción las estructuras metálicas con un 11%, madera y otros ocupan un 3% de esta estadística (INEC, 2020). McDermot et al., 2020 en su estudio "Improving performance of infrastructure projects in developing countries: an Ecuadorian case study" analiza que el 29% del costo total de las obras (aproximadamente US\$16 millones) de su caso de estudio consistieron en estructuras de hormigón.

El consumo de cemento en Ecuador para el año 2019 se estima en 6.030 miles de toneladas, disminuye en 0.5% respecto al año previo, sin embargo dicha variación es menor con respecto a años previos (FICEM, 2020). Esta producción se distribuye geográficamente en el Ecuador, teniendo la zona del litoral una capacidad de producción de 5.4 millones de toneladas métricas, esto equivale al 62.8% del volumen que el país produce, luego se ubica la sierra norte del Ecuador con una capacidad de 1.6 millones de toneladas métricas que representa el 18.6% del volumen del Ecuador y la sierra central-austral con una producción de 1.6 millones de toneladas métricas que representa el 18.6% del volumen de cemento ecuatoriano (Acebo et al., 2016).

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Cuantificar el desempeño ambiental del clinker, cemento y concreto premezclado en el Ecuador mediante el uso de la metodología de análisis de ciclo de vida para la identificación de oportunidades de mejora en el sector de la construcción.

1.5.2. Objetivos Específicos

Determinar las entradas y salidas de materia y energía ambientalmente relevantes en la producción de clinker, cemento y concreto premezclado.

Validar el inventario de emisiones mediante el uso de la metodología de medición continua de emisiones vs. factores de emisión.

Establecer indicadores de impacto de ciclo de vida para la producción de clinker, cemento y concreto premezclado de acuerdo con la naturaleza de los productos y su inventario de entradas y salidas.

Identificar puntos críticos de los sistemas de clinker, cemento y concreto premezclado.

1.6. Justificación

La construcción de estructuras para el desarrollo de las actividades humanas es una actividad necesaria, hacerla sostenible es el reto para los diferentes stakeholders como el sector público, privado y la academia. Para lograrlo es necesario medir el impacto ambiental en el sector de la construcción con herramientas como el análisis de ciclo de vida, para esto se requiere desarrollar un inventario de información cuantitativa de impacto ambiental de dicho sector, siendo sus principales materias primas el clinker, cemento y concreto premezclado. Esta información permitirá calcular el desempeño ambiental de edificaciones y proyectos de construcción que servirá de línea base para una optimización y reducción del impacto ambiental de la construcción.

1.7. Estructura del proyecto

Capítulo 1

Es este capítulo se presenta el planteamiento del problema, analizando de manera global el impacto del cambio climático y el sector de la construcción, siendo el concreto el principal material utilizado en esta industria, el principal componente del concreto es el cemento, este material posee grandes implicaciones ambientales que son descritas en este capítulo, para finalizar el planteamiento del problema se presenta la situación local del sector de la construcción a nivel Ecuador. En este capítulo se incluye el objetivo general del proyecto y los objetivos específicos, se finaliza con la justificación del estudio.

Capítulo 2

En el capítulo 2 se presenta el marco teórico, donde se exponen los antecedentes de la investigación por industria de clinker/cemento y concreto, cada uno tiene una descripción de su proceso de fabricación detallado, su clasificación de acuerdo a normativas existentes y una revisión bibliográfica de estudios de ACV disponibles en la literatura.

Capítulo 3

El marco metodológico se lo describe en el capítulo 3, donde se define la metodología para comprar las emisiones medidas continuamente y factores de emisión, también se incluye una breve descripción de la metodología ISO 14044:2006 de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), se presenta el alcance del estudio, unidad funcional, la construcción de análisis de inventario donde se describen los procesos tomados de bases de datos, tomados de literatura científica también se analiza la metodología utilizada para obtener estos inventarios. Por último, se establece la metodología de análisis de impacto de ciclo de vida con sus respectivos indicadores para la producción de clinker, cemento, concreto premezclado y se menciona el software utilizado para el desarrollo del estudio.

Capítulo 4

Los resultados se exponen en el capítulo 4, divididos en la comparativa de metodologías de estimación de emisiones al aire, resultados de análisis de inventario y de evaluación de impacto del clinker, se determina la contribución por procesos y se compara con otros estudios, el análisis del cemento y su contribución por procesos, finalizamos con los resultados de concreto premezclado y una comparativa de Global Warming Potential (GWP) con otros resultados disponibles en la literatura.

Capítulo 5

Finalizando la investigación, en este capítulo exponemos las conclusiones y las recomendaciones, acorde a nuestros objetivos planteados, se menciona una comparativa con otros estudios y se realizan recomendaciones acordes a lo observado y analizado en el capítulo 4.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Proceso de fabricación del Cemento

De manera general, el proceso de fabricación de cemento se compone de 5 etapas como se muestra en la [Figura 2.1](#) (Mindess & Young, 1981):

2.1.1. Extracción de Materias Primas

Las materias primas calizas y arcillas son extraídas de un área minera designada. La preparación de materias primas comprende los procesos de trituración y molienda que buscan a reducir el tamaño de los materiales y homogenizarlos hasta obtener una harina cruda de composición química uniforme para ser alimentada al proceso de fabricación de Clinker. En esta etapa se dan los siguientes procesos:

Trituración primaria y secundaria de calizas como Almacenamiento y pre-homogenización de caliza: La caliza pasa por dos etapas de trituración; una primaria y una etapa de trituración secundaria. El material proveniente de la trituración primaria pasa por un separador instalado sobre la trituradora secundaria en donde se dividen los materiales de menos de 100 mm de diámetro, los cuales pasan directamente a la sala de pre-homogenización de caliza. Los materiales de más de 100 mm de diámetro ingresan a una tolva desde donde son alimentados a la trituración secundaria. Finalmente, todos los materiales son llevados hasta la zona de almacenamiento de caliza (S. Ghosh, 1991).

Trituración de arcillas: Las arcillas son alimentadas a una trituradora. Por esta trituradora se alimentan otras materias primas, como la arcilla de alta alúmina y el mineral de hierro y materias primas externas a la planta (Domone & Illston, 2010).

Almacenamiento de arcillas y otros materiales correctivos: El almacenamiento de materias primas externas, y en especial la arcilla de alta alúmina, requieren de patios para el secado y almacenamiento. El material seco es apilado y cubierto con plástico en el área de la trituración de arcillas. El componente arcilloso y el mineral de hierro son alimentados por la trituración de arcilla hasta una sala longitudinal de correctivos para desde este lugar conducirlos hasta las tolvas de dosificación (Mehta & Monteiro, 1993).

2.1.2. Preparación de Crudo

Las materias primas (caliza, arcilla amarilla, arcilla roja y mineral de hierro) son dosificadas y alimentadas hacia el molino de crudo. Esta dosificación está basada en la composición química de los materiales y debe de ser controlada, para lograr la producción de una harina cruda de composición constante que garantice la calidad estable del Clinker a producir. Posteriormente pasan por un sistema de molinos.

Dichos molinos deben de contar con separadores de alta eficiencia y un variador para la optimización de la producción de crudo y el consumo de energía (S. N. Ghosh & Yadav, 1996).

Almacenamiento y homogenización de crudo: El material se lo coloca en silos de almacenamiento, los cuales tienen un sistema de llenado y extracción que permiten una homogenización interna, aparte del almacenamiento y así mejorar la homogenización del producto aún más (Troxell et al., 1968).

2.1.3. Producción de Clinker

La harina cruda es alimentada a través de una torre de precalentamiento en donde se produce un intercambio térmico, aprovechando los gases calientes generados en los hornos y cámara de combustión para convertir la harina cruda en un nuevo mineral denominado clinker, a una temperatura de 1450°C cerca de la salida del horno (Kurdowski, 2014). En este proceso se utiliza como combustible principal el coque, petróleo y carbón, y combustibles alternativos tales como biomasa, aceites y llantas usadas. Existe la posibilidad de utilizar búnker u otros combustibles líquidos (Kosmatka et al., 2011).

2.1.4. Molienda de Cemento

Finalmente, el clinker se mezcla con yeso y material cementante suplementario (SCM). En esta etapa, de ser necesario, se utiliza también Clinker importado, el cual es almacenado en pilas en patios dentro de la planta. Posterior a esto se realiza la molienda final de cemento (Domone & Illston, 2010).

2.1.5. Despacho

Se llenan sacos a través de tolvas para posterior transportarlos a través de bandas. Paletizadoras cargan sacos sobre láminas plásticas y montacargas retiran los plásticos y colocan los sacos apilados en camiones. Para despacho a granel, camiones cisternas se ubican debajo de silos y se descarga a través de mangas (AM Neville, 1995).

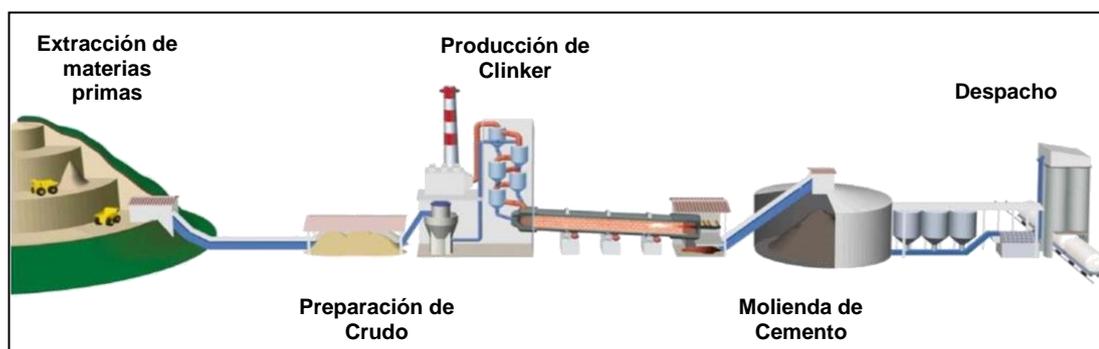


Figura 2.1 Esquema de Fabricación de Cemento
(Fuente: Adaptado de Salas et al., 2015)

2.2. Clasificación de los cementos

Existen 4 normativas para la clasificación de los cementos, de estas tres son americanas y una europea:

TABLA 1 NORMATIVAS DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

Normativa	Descripción
ASTM C150	Especificación Normalizada para Cemento Portland
ASTM C595	Especificación Normalizada para Cementos Adicionados Hidráulicos
ASTM C1157	Especificación Normalizada de Desempeño para Cemento Hidráulico
UNE-EN 197-1	Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

(Fuente: El Autor)

Las diferentes normativas han evolucionado durante el último siglo, la aparición de nuevas tecnologías y materias primas han permitido innovar en su composición. La normativa ASTM C150 tuvo su primera edición en el año 1940, la misma clasificaba a los cementos portland por requerimientos físicos y químicos para propósitos específicos de aplicación (Kosmatka et al., 2011). Se engloban cinco grupos (ASTM, 2020b):

TABLA 2 CLASIFICACIÓN DE CEMENTOS DE ACUERDO CON LA NORMATIVA ASTM C150

Clasificación	Descripción
Tipo I	Cemento Portland
Tipo II	Cemento Portland con moderada resistencia a los sulfatos
Tipo III	Cemento Portland con alta resistencia inicial
Tipo IV	Cemento Portland con bajo calor de hidratación
Tipo V	Cemento Portland con alta resistencia a los sulfatos

(Fuente: ASTM C150)

La normativa ASTM C595 fue publicada en 1967, los cementos hidráulicos adicionados son elaborados en base a cemento portland añadiendo materias primas como slag, ceniza volante, humo de sílice, arcilla calcinada, puzolanas, caliza o combinaciones de estos materiales. Se siguen manteniendo los requerimientos físicos y químicos para su producción. Se los clasifica en las siguientes categorías (ASTM, 2020d):

TABLA 3 CLASIFICACIÓN DE CEMENTOS DE ACUERDO CON LA NORMATIVA ASTM C595

Clasificación	Descripción
Tipo IS	Cemento Portland con escorias de altos hornos
Tipo IP	Cemento Portland puzolánico
Tipo IL	Cemento Portland calcáreo
Tipo IT	Cemento compuesto ternario

(Fuente: ASTM C595)

La normativa ASTM C1157 es el resultado de la innovación de casi medio siglo, siendo esta publicada en 1992, esta normativa clasifica los cementos de acuerdo a su desempeño en pruebas físicas, prescribiendo restricciones químicas y de materias primas (ASTM, 2020a). Se clasifican en seis categorías:

TABLA 4 CLASIFICACIÓN DE CEMENTOS DE ACUERDO CON LA NORMATIVA ASTM C1157

Clasificación	Descripción
Tipo GU	Cemento Hidráulico de uso general
Tipo HE	Cemento Hidráulico de alta resistencia inicial
Tipo MS	Cemento Hidráulico de moderada resistencia a los sulfatos
Tipo HS	Cemento Hidráulico de alta resistencia a los sulfatos
Tipo MH	Cemento Hidráulico de moderado calor de hidratación
Tipo LH	Cemento Hidráulico de bajo calor de hidratación

(Fuente: ASTM C1157)

La normativa europea UNE-EN 197-1 clasifica los cementos de acuerdo a sus requerimientos físicos, químicos, adiciones y desempeño, las clasifica en cinco tipos (AENOR, 2011):

TABLA 5 CLASIFICACIÓN DE CEMENTOS DE ACUERDO CON LA NORMATIVA UNE-EN 197-1

Clasificación	Descripción
CEM I	Cemento Portland
CEM II	Cemento Portland compuesto
CEM III	Cemento con escorias de altos hornos
CEM IV	Cemento puzolánico
CEM V	Cemento compuesto

(Fuente: UNE-EN 197-1)

2.3. Proceso de fabricación del concreto premezclado

El proceso de fabricación de concreto premezclado se puede resumir en cuatro etapas como se muestra en la [Figura 2.2](#) (Kosmatka et al., 2011; AM Neville, 1995):

1. Recepción y almacenamiento de materias primas
2. Recepción y almacenamiento de cemento
3. Dosificación y mezclado
4. Carga y distribución

Como etapa adicional se puede incluir el proceso de reciclaje de agregados y agua, esto debido a la limpieza de camiones mezcladores (Kosmatka et al., 2011).

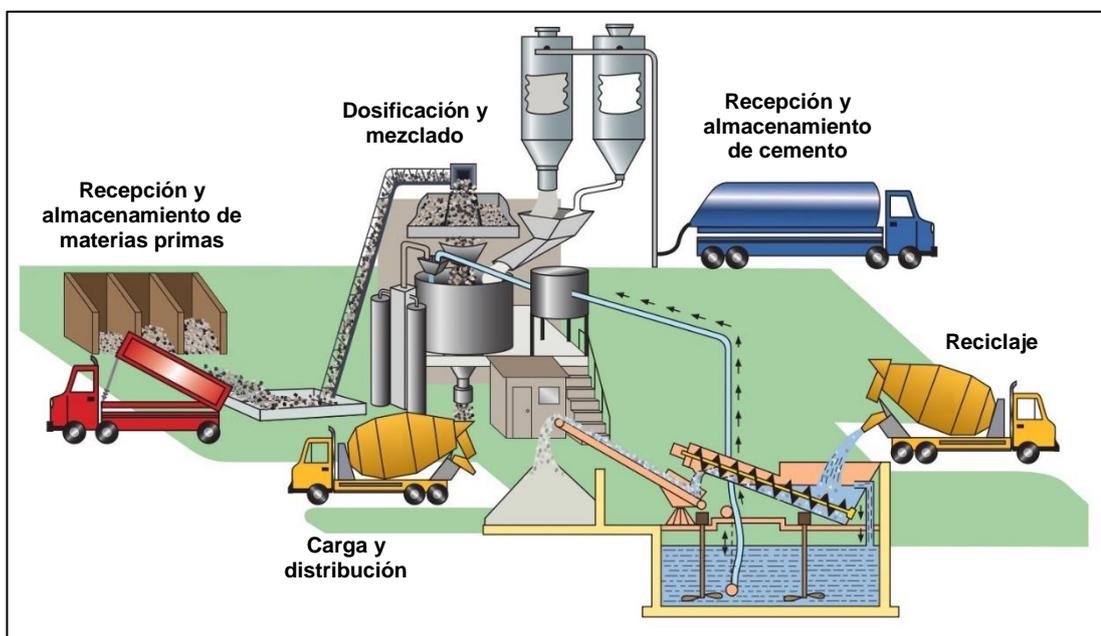


Figura 2.2 Proceso de Fabricación de Concreto premezclado
(Fuente: Adaptado de Kosmatka et al., 2011)

2.3.1. Recepción y almacenamiento de Agregados

Los diferentes tipos de agregados utilizados en el proceso de elaboración de concreto premezclado son transportados desde su punto de extracción hasta la planta de concreto. Los agregados son principalmente de 2 tipos: piedra y arena de mina, los mismos que deben cumplir con especificaciones técnicas, para su uso en la elaboración de concreto premezclado (ASTM, 2018). Una vez que la materia prima ingresa a la Planta es almacenada en forma de pilas en un sector específico (Anderson et al., 1992). Desde esta área de almacenamiento se lleva el agregado hasta la tolva de alimentación, por medio de una Cargadora frontal, desde donde se traslada por medio de una banda transportadora, hasta la tolva de dosificación.

2.3.2. Recepción y almacenamiento de Cemento

El cemento empleado en el proceso de elaboración de concreto premezclado es transportado desde la planta de producción de cemento, a través de camiones cisternas, especialmente acondicionados para este propósito (Kosmatka et al., 2011; Troxell et al., 1968).

El cemento al igual que los agregados, es pesado en la balanza a su ingreso a la planta y luego descargado neumáticamente en silos de almacenamiento, éstos son utilizados dependiendo de la demanda.

2.3.3. Dosificación y mezclado

Dosificación de Agregados

El proceso se inicia cuando la cargadora frontal recoge los agregados y los coloca en la tolva de alimentación en la planta; éstos son transportados por medio de una banda móvil se desplaza sobre las tolvas colocando los agregados en los compartimentos de dosificación, bajo las cuales se ubican balanzas dosificadoras de agregados que descargan los materiales automáticamente hacia una banda transportadora (Anderson et al., 1992; Mindess & Young, 1981).

Dosificación de cemento

El cemento que se encuentra en los silos de almacenamiento es transportado por un sistema de tornillo sin fin directamente hacia una balanza vibratoria que se encarga de dosificar la cantidad de cemento que requiere la elaboración de hormigón, para luego pasar hacia el tambor premezclador (Troxell et al., 1968).

Dosificación de agua y aditivos

El agua para emplear es bombeada desde la cisterna donde se encuentra almacenada y su cantidad es controlada por el sistema automatizado de elaboración de concreto premezclado (AM Neville, 1995).

El aditivo es un componente que se agrega dependiendo del tipo de hormigón requerido por el cliente, lo que es dosificado por balanza, pudiéndose emplear varios tipos de aditivos, siendo los más comunes: plastificantes, retardadores y acelerantes (ASTM, 2019). Estos, son almacenados en tanques de PVC, desde donde son bombeados hacia el tambor premezclador (Kosmatka et al., 2011).

2.3.4. Carga y distribución del concreto formulado

Una vez que todos los componentes se encuentran en el tambor premezclador, éste procede a mezclarlos hasta obtener el tipo de hormigón deseado (Mindess & Young, 1981; Troxell et al., 1968), para finalmente ser despachado en los mixers y enviados

hacia la obra civil a cargo del cliente de la empresa (Anderson et al., 1992; Mehta & Monteiro, 1993).

2.3.5. Proceso de Reciclaje

Comprende la recuperación de materia prima de residuos de concreto retenidos en el transporte. Este proceso se resume en la recicladora separa el agregado grueso y el agregado fino de la pasta de la mezcla de concreto (Kosmatka et al., 2011).

El agregado grueso y fino son llevados al sitio de recepción de material y la pasta pasa a un tanque de agitación donde se agrega agua y es empleado nuevamente en el proceso.



Figura 2.3 Recicladora de materias primas del lavado
(Fuente: El Autor)

2.4. Clasificación de concretos premezclados

Los concretos podemos clasificarlos por su resistencia a la compresión como por sus propiedades especiales.

Por su resistencia a la compresión evaluada bajo la normativa ASTM C39 (ASTM, 2020c) podemos agruparlos en tres categorías generales (Mehta & Monteiro, 1993):

1. **Concreto de baja resistencia:** Menor a 18 MPa.
2. **Concreto convencional:** Entre 18 a 40 MPa.
3. **Concreto de alta resistencia:** Mayor a 40 MPa.

Por sus propiedades especiales podemos mencionar concretos ligeros, de piso, lanzado, masivos, de alta densidad, compactado con rodillo, permeable, coloreado, etc. (Kosmatka et al., 2011; Mindess & Young, 1981; Troxell et al., 1968). En ambas clasificaciones los concretos pueden ser elaborados con cementos portland, adicionados, por desempeño, acorde con las normativas de la [Tabla 1](#).

2.5. Revisión bibliográfica de análisis de ciclo de vida clinker y cemento

En la última década ha existido un aumento en el análisis de los impactos ambientales de la industria cementera, Salas et al., 2016 realiza una amplia revisión de literatura hasta el año 2016 en el que se publicó el estudio, el autor extiende este estudio y agrega nuevas investigaciones. La [Tabla 6](#) nos brinda la metodología general seleccionada para las investigaciones. La [Tabla 7](#) expone ejemplos de resultados de categorías de impacto de ACV en sus unidades correspondientes, la unidad funcional para análisis de esta tabla es 1 ton de material.

El alcance de los estudios de ACV de cemento abarcan sus etapas de extracción de materia prima, trituración, clinkerización, producción de cemento, esto varía según el propósito de la investigación. La unidad funcional usual para clinker es 1 ton métrica de clinker y para cemento 1 ton métrica de material cementicio, este puede ser PC, OPC, cemento convencional, cemento adicionado, etc.

Los estudios de Feiz et al., 2015; W. Chen et al., 2015; García-Gusano et al., 2015a y Stafford et al., 2016 desarrollan un ACV de la producción de clinker de Alemania, China, España y Portugal respectivamente, estos resultados sirven de input para la preparación de PC o cementos adicionados de sus estudios.

Li et al., 2015; Valderrama et al., 2012; Feiz et al., 2015; Çankaya & Pekey, 2019; Bushi & Meil, 2014 y Vázquez-Rowe et al., 2019 analizan el OPC como principal producto y línea base de mejora. García-Gusano et al., 2015b captura CO₂ y evalúa la efectividad del proceso mediante el uso de ACV en el cemento, su reducción más baja es del 22% en GWP.

Stafford et al., 2016 presenta un estudio de ACV de dos tipos de producción de clinker, una tradicional y otra alternativa, en la etapa de producción de cemento, se agrupan por su clasificación de acuerdo al estándar europeo UNE-EN 197-1:2011 (AENOR, 2011), lo que permite que estos resultados sean comparables con la producción de otra planta que elabore su cemento con la misma normativa, utilizando la misma metodología de cálculo y bases de datos. Yang et al., 2017 compara los desempeños ambientales entre cementos con un desarrollo de resistencia a 28 días y de alta resistencia inicial.

Vázquez-Rowe et al., 2019 sustituye parcialmente el contenido de clinker por otros componentes tales como puzolana, slag y relleno calcáreo. El alcance geográfico es Perú y la composición del cemento es similar a la producida en Ecuador. Este estudio solo contempla GWP como única categoría de impacto.

El software más utilizado en los estudios es SimaPro desarrollado por PRé Sustainability y la base de datos en común entre los estudios es Ecoinvent, Çankaya & Pekey, 2019 combina Ecoinvent y U.S. Life Cycle Inventory (USLCI) Database del Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL), Bushi & Meil, 2014 utiliza Athena LCI de Athena Sustainable Materials Institute de Canadá.

**TABLA 6
METODOLOGÍAS SELECCIONADAS EN ESTUDIOS DE ACV DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO**

Referencia	Producto	País	Unidad Funcional	Límite del Sistema	Software	Base de Datos
(C. Li et al., 2015)	Cemento Portland	China	1 ton de PC	cradle-to-gate	x	x
(Valderrama et al., 2012)	Nuevas tecnologías.	España	1 kg de clinker	Producción de clinker	SimaPro 7.2	Ecoinvent v2.2
(Huntzinger & Eatmon, 2009)	Comparativo de PC con tecnologías alternativas	Estados Unidos	200 100 lb-sacos de PC	cradle-to-gate	SimaPro 6	x
(García-Gusano et al., 2015b)	Aplicación de captura de CO ₂	España	1 ton de cemento	cradle-to-gate	SimaPro 7.3.3	Ecoinvent v2.2
(C. Chen et al., 2010)	Producción de cemento y variabilidad entre plantas	Francia	1 kg de PC	cradle-to-gate	SimaPro 7	Ecoinvent v2.0
(Strazza et al., 2011)	Mejora de productividad, uso de recursos	Italia	1 ton de Cemento	cradle-to-gate	SimaPro 7.1	x
(W. Chen et al., 2015)	Cemento, HybridLCA	China	1 ton de PC	cradle-to-gate	x	x
(C. Li et al., 2014)	Cemento Portland, clinker	China	1 ton de PC y 1 ton de clinker	cradle-to-gate	x	Ecoinvent v2.2
(Feiz et al., 2015)	4 productos de cemento	Alemania	1 ton de cemento	cradle-to-gate	SimaPro 7.3	Ecoinvent
(Yang et al., 2017)	LCA comparativo entre varias resistencias	China	1 ton de cemento	cradle-to-gate	x	x
(Stafford et al., 2016)	Cemento Portland	Portugal	1 ton de OPC	cradle-to-gate	SimaPro 8.0.3	Ecoinvent
(Çankaya & Pekey, 2019)	Cemento Portland y clinker	Turquía	1 ton de cemento y 1 ton de clinker	cradle-to-gate	SimaPro 8.0.4	Ecoinvent y USLCI
(Bushi & Meil, 2014)	Cemento Portland	Canadá	1 ton de OPC y 1 ton de cemento	cradle-to-gate	x	Athena LCI
(Vázquez-Rowe et al., 2019)	Cemento Portland	Perú	1 ton de OPC y 1 ton de cemento	cradle-to-gate	x	Ecoinvent v3.3

(Fuente: Adaptada por el autor de estudio de Salas et al., 2016)

TABLA 7
EJEMPLOS DE EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA DE CEMENTOS EN LA LITERATURA.^a

Referencia	Producto/ Descripción	Tipo de Resultado	GWP kgCO ₂ eq	AP kgSO ₂ eq	EP kg PO ₄ eq	POCP kgC ₂ H ₄ eq	ADP kgSb-eq	ODP kgCFC-11eq
(C. Li et al., 2015)	1 ton de PC	PC-China	798.73	1.467	0.35	1.994		
(Valderrama et al., 2012)	1000 kg de PC	PC, líneas antiguas de producción	987	2.55	0.372		3.34	
		PC, líneas BAT de producción	938	2.16	0.31		2.88	
(C. Chen et al., 2010)	1000 kg de PC	Caso de Estudio	782	3.49	0.504	76	2.43	4.20x10 ⁻⁰⁵
		Francia (ATILH)	899	0.224	0.297	59.5	2.43	4.20x10 ⁻⁰⁵
(Feiz et al., 2015)	1 ton de clinker	Clinker	850					
		PC 92% clinker	779					
	1 ton de cemento	Cementante 50% clinker	452					
		Cementante 27% clinker	265					
(W. Chen et al., 2015)	Cemento, HybridLCA	Dry kiln large production scenario	734	0.89 ^b	0.0102 ^b			1.28x10 ⁻⁰⁶
		Dry kiln moderate production scenario	801	2.54 ^b	0.0103 ^b			1.59x10 ⁻⁰⁶
		Dry kiln small production scenario	693	0.98 ^b	0.00986 ^b			1.29x10 ⁻⁰⁶
		Shaft kiln	1000	3.82 ^b	0.0136 ^b			1.54x10 ⁻⁰⁶
(García-Gusano et al., 2015b)	Aplicación de captura de CO ₂	2010-BASE	799	3.4				4.37x10 ⁻⁰⁵
		2030-BASE	620	1.64				2.28x10 ⁻⁰⁵
		2030-PCC	530	4.73				1.67x10 ⁻⁰⁵
(García-Gusano et al., 2015a)	1 ton de clinker	Industria Española	929	3.93				
	1 ton de cemento		799	3.4				
		Cemento 32.5 MPa	639	2.78 ^b	4.62x10 ^{-04b}			

Referencia	Producto/ Descripción	Tipo de Resultado	GWP kgCO ₂ eq	AP kgSO ₂ eq	EP kg PO ₄ eq	POCP kgC ₂ H ₄ eq	ADP kgSb-eq	ODP kgCFC-11eq
(Yang et al., 2017)	1 ton de cemento	Cemento 32.5R MPa	634	2.77 ^b	4.55x10 ^{-04b}			
		Cemento 42.5 MPa	765	3.69 ^b	5.31x10 ^{-04b}			
		Cemento 42.5R MPa	725	3.31 ^b	5.07x10 ^{-04b}			
		Cemento 52.5 MPa	918	4.75 ^b	6.60x10 ^{-04b}			
		Cemento 52.5R MPa	881	4.51 ^b	6.36 10 ^{-04b}			
(Stafford et al., 2016)	1 ton de OPC	OPC-Portugal	632	1.97	0.354	0.158	1.81	
(Çankaya & Pekey, 2019)	1 ton de clinker	Clinker (TS)	890	1.33 ^b	1.08x10 ^{-01b}			2.52x10 ⁻⁰⁶
		Clinker (AS)	878	1.05 ^b	1.04x10 ^{-01b}			1.92x10 ⁻⁰⁶
		OWC (TS)	840.73	1.36 ^b	1.06x10 ^{-01b}			2.67x10 ⁻⁰⁶
		OWC (AS)	864.23	1.18 ^b	1.09x10 ^{-01b}			2.27x10 ⁻⁰⁶
	1 ton cemento	CEM IV (TS)	665.54	1.16 ^b	8.51x10 ^{-02b}			2.67x10 ⁻⁰⁶
		CEM IV (AS)	528.88	0.87 ^b	6.85x10 ^{-02b}			2.29x10 ⁻⁰⁶
		CEM II (TS)	765.84	1.27 ^b	9.73x10 ^{-02b}			2.68x10 ⁻⁰⁶
		CEM II (AS)	720.72	1.09 ^b	9.35x10 ^{-02b}			2.35x10 ⁻⁰⁶
		CEM I (TS)	849.85	1.37 ^b	1.08x10 ^{-01b}			2.71x10 ⁻⁰⁶
CEM I (AS)	837.55	1.15 ^b	1.06x10 ^{-01b}			2.22x10 ⁻⁰⁶		
(Bushi & Meil, 2014)	1 ton de OPC	OPC-Canadá	950	4.1	1.30x10 ^{-01b}			1.10x10 ⁻⁰⁸
	1 ton cemento	Cemento	850	3.7	1.20x10 ^{-01b}			9.60 10 ⁻⁰⁹
(Vázquez-Rowe et al., 2019)	1 ton de OPC	OPC	746					
	1 ton cemento (puzolana)	Cemento (puzolana)	559					
	1 ton cemento (slag)	Cemento (slag)	741					

^a Resultados entre estudios no son comparables a que su objetivo y métodos son diferentes entre ellos.

^b Acuático

(Fuente: Adaptada por el autor de estudio de Salas et al., 2016)

2.6. Revisión bibliográfica de análisis de ciclo de vida del concreto

La disponibilidad de estudios de ACV de concreto premezclado (RMX) es limitada, la literatura desarrollada corresponde a los últimos 5 años, existen varios tipos de estudios, mismos que se presentan en la [Tabla 8](#), algunos analizan el comportamiento del concreto convencional para su país con las resistencias comerciales del mismo, otros analizan mejoras ambientales al producto mediante la adición de residuos en su composición. Las resistencias a la compresión son varias y se encuentran en el rango de 20 MPa. a 70 MPa. como se muestra en la [Tabla 9](#).

Hossain et al., 2020 analiza concretos convencionales fabricados con cementos que poseen adiciones de escoria, puzolana y ceniza volante en China, con resistencias entre 59 MPa a 70 MPa. Gmünder et al., 2017 en Colombia realiza un estudio de concretos convencionales fabricados con cemento puzolánico y en Perú, concreto fabricado con cemento Portland, con adiciones de caliza y puzolana, para ambos países, las resistencias varían entre 20 a 40 MPa. Muigai et al., 2013; Fernanda Belizario Silva et al., 2020 y Werner & Richter, 2007, estudian el impacto ambiental concretos en Sudáfrica, Brasil y Canadá, con resistencias entre 20 MPa y 50 MPa. Para estos estudios, la unidad funcional es 1m^3 de concreto y el alcance abarca la extracción de materias primas y la fabricación del concreto. Adicional, se menciona un estudio realizado por Salas et al., 2018 de análisis ambiental de concreto fabricado con geopolímeros en Ecuador, tecnologías que proyectadas a escalas industriales pueden convertirse en alternativas ambientalmente factibles.

Kleijer et al., 2017 compara mezclas de concreto convencional versus concreto reciclado en Suiza, la resistencia a la compresión de este concreto es 30 MPa en ensayado bajo la normativa ASTM C39. Se plantean tres escenarios, el primero es la producción de concreto reciclado, el segundo y el tercer escenario son de producción de concreto convencional con diferentes fuentes y distancias de canteras de agregados hasta la planta productora de concreto. El alcance del estudio va desde la extracción de materias primas hasta el transporte del concreto a la obra. La unidad funcional es 1 m^3 de concreto y los resultados de GWP para el escenario 1, 2 y 3 son $274,28\text{ kg CO}_2\text{ Eq/m}^3$ de concreto, $280\text{ kg CO}_2\text{ Eq/m}^3$ de concreto y $291\text{ kg CO}_2\text{ Eq/m}^3$ de concreto. Para la comparativa de este estudio, se selecciona como alcance hasta la producción, para un concreto reciclado el GWP es $271\text{ kg CO}_2\text{ Eq/m}^3$ de concreto y para un concreto convencional es $275\text{ kg CO}_2\text{ Eq/m}^3$ de concreto.

Nakic, 2018 realiza un trabajo comparativo ambiental entre concreto convencional (escenario 1) y concreto elaborado con cenizas de lodos residuales (escenario 2) en Croacia, el concreto está preparado con cemento Portland con adiciones de escorias y caliza, clasificado como CEMII/B-M(S-V)42.5N de acuerdo a la normativa UNE-EN 197-1 descrita en la [Tabla 5](#). La resistencia a la compresión del concreto convencional es de 52 MPa y del concreto con cenizas de lodo residual es de 54 MPa. El alcance del proyecto es desde la producción de materias primas hasta la producción del concreto. La unidad funcional es de 1 m^3 de concreto. Los resultados para el escenario 1 y 2 en GWP respectivamente son $237.88\text{ kg CO}_2\text{ Eq/m}^3$ de concreto y $218\text{ kg CO}_2\text{ Eq/m}^3$ de concreto.

TABLA 8
METODOLOGÍAS SELECCIONADAS EN ESTUDIOS DE ACV DE PRODUCCIÓN DE CONCRETO

Referencia	Producto	País	Unidad Funcional	Límite del Sistema	Software	Base de Datos
(Salas et al., 2018)	Concreto en base a geopolímeros	Ecuador	1 m ³	cradle-to-gate	SimaPro	Ecoinvent
(Nakic, 2018)	Concreto con lodos industriales	Croacia	1 m ³	cradle-to-gate	Gabi	x
(Kleijer et al., 2017)	Concreto convencional y Ecobeton	Suiza	1 m ³	cradle-to-gate	x	Ecoinvent v2.2
(Hossain et al., 2020)	Concreto con puzolana natural adicionada	China	1 m ³	cradle-to-gate	SimaPro 9.1.5	Chinese Life Cycle Database
(Turk et al., 2015)	Concreto convencional y alternativas	Eslovenia	1 m ³	cradle-to-gate	GaBi	PE International
(Gmünder et al., 2017) ^c	Concreto convencional, resistencias varias	Colombia	1 m ³	cradle-to-gate	OpenLCA	Ecoinvent
(Gmünder et al., 2017) ^c	Concreto convencional, resistencias varias	Perú	1 m ³	cradle-to-gate	OpenLCA	Ecoinvent
(Muigai et al., 2013) ^c	Concreto convencional, resistencias varias	Sudáfrica	1 m ³	cradle-to-gate	OpenLCA	Ecoinvent
(Werner & Richter, 2007) ^c	Concreto convencional, resistencias varias	Canadá	1 m ³	cradle-to-gate	OpenLCA	Ecoinvent
(F. B. Silva et al., 2019) ^c	Concreto mediana resistencia	Brasil	1 m ³	cradle-to-gate	OpenLCA	Ecoinvent
(Gursel & Ostertag, 2017)	Concreto convencional	Singapur	1 m ³	cradle-to-gate	x	x

^c Adaptado por el autor en OpenLCA (CML-2001)

(Fuente: Adaptada por el autor varios estudios)

TABLA 9
EJEMPLOS DE EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA DE CONCRETOS EN LA LITERATURA.^d

Referencia	Producto/ Descripción	Tipo de Resultado	GWP kgCO ₂ eq	AP kgSO ₂ eq	EP kgPO ₄ eq	POCP kgC ₂ H ₄ eq	ADP kgSb-eq	ODP kgCFC-11eq
(Salas et al., 2018)	1 m ³ Geopolymer concrete	5 MPa (Energía Ecuador 2018)	84.00	0.546	0.12	0.022	0.546	1.13 x10 ⁻⁰⁴
		5.5 MPa (Energía Ecuador 2018)	95.00	0.625	0.136	0.025	0.625	1.33x10 ⁻⁰⁴
		15 MPa (Energía Ecuador 2018)	110.00	0.727	0.155	0.029	0.727	1.61x10 ⁻⁰⁴
		15 MPa (Energía Ecuador 2012)	163	1.237	0.201	0.049	1.237	1.67x10 ⁻⁰⁴
		15 MPa (Hidróxido de Sodio Importado de Europa)	254	1.263	1.245	0.056	1.263	1.78x10 ⁻⁰⁴
(Nakic, 2018)	1 m ³ de concreto convencional	Concreto convencional	237.88	0.425	0.0634	0.027	4.15x10 ⁻⁰⁴	1.30x10 ⁻⁰⁸
	1 m ³ de concreto con 10% de lodos industriales	Concreto con 10% de lodos industriales	218.67	0.391	0.0594	0.024	3.76x10 ⁻⁰⁴	1.25x10 ⁻⁰⁸
(Kleijer et al., 2017)	1 m ³ de concreto convencional	Concreto convencional	275					
	1 m ³ de concreto (Agregado Reciclado)	Concreto (Agregado Reciclado)	271					
(Hossain et al., 2020)	1 m ³ de concreto convencional	59 MPa	511	8.247				
	1 m ³ de concreto con slag	63 MPa	446	7.745				
	1 m ³ de concreto con slag	64 MPa	366	6.978				

Referencia	Producto/ Descripción	Tipo de Resultado	GWP kgCO ₂ eq	AP kgSO ₂ eq	EP kgPO ₄ eq	POCP kgC ₂ H ₄ eq	ADP kgSb-eq	ODP kgCFC-11eq
	1 m ³ de concreto con ceniza volante	68 MPa	479	9.569				
	1 m ³ de concreto con puzolana	70 MPa	432	7.554				
	1 m ³ de concreto con puzolana	64 MPa	390	7.116				
(Turk et al., 2015)	1 m ³ de concreto convencional	43.2 MPa	260	0.44	0.069			
	1 m ³ de concreto con ceniza volante	43.4 MPa	195	0.34	0.052			
	1 m ³ de concreto con arena de fundición	30.1 MPa	225	0.36	0.058			
	1 m ³ de concreto con slag de acero	37.4 MPa	250	0.4	0.044			
(Gmünder et al., 2017) ^c	1 m ³ de concreto de Cemento con puzolana Colombia	20 MPa	251.90	0.923	0.271	0.028 ^e	1.011	8.75x10 ⁻⁰⁶
		20 MPa (Autocompactante)	244.21	0.903	0.262	0.027 ^e	0.973	9.12x10 ⁻⁰⁶
		40 MPa	301.21	1.081	0.317	0.033 ^e	1.188	9.91x10 ⁻⁰⁶
(Gmünder et al., 2017) ^c	1 m ³ de concreto de Cemento Portland Perú	20 MPa	316.24	0.862	0.283	0.034 ^e	1.183	8.70x10 ⁻⁰⁶
		20 MPa (Autocompactante)	382.83	0.973	0.322	0.037 ^e	1.299	8.90x10 ⁻⁰⁶
		40 MPa	392.74	1.035	0.341	0.041 ^e	1.442	1.01x10 ⁻⁰⁵
	1 m ³ de concreto de Cemento con caliza Perú	20 MPa	292.91	0.790	0.256	0.029 ^e	1.038	7.97x10 ⁻⁰⁶
		20 MPa (Autocompactante)	303.43	0.854	0.276	0.033 ^e	1.182	9.16x10 ⁻⁰⁶
		40 MPa	303.24	0.854	0.276	0.033 ^e	1.181	9.14x10 ⁻⁰⁶
		20 MPa	200.92	0.646	0.184	0.019 ^e	0.795	9.09x10 ⁻⁰⁶

Referencia	Producto/ Descripción	Tipo de Resultado	GWP kgCO ₂ eq	AP kgSO ₂ eq	EP kgPO ₄ eq	POCP kgC ₂ H ₄ eq	ADP kgSb-eq	ODP kgCFC-11eq
	1 m ³ de concreto de Cemento con puzolana Perú	20 MPa (Autocompactante)	235.80	0.698	0.196	0.018 ^e	0.804	9.40x10 ⁻⁰⁶
		40 MPa	246.50	0.762	0.217	0.022 ^e	0.949	1.06x10 ⁻⁰⁵
(Muigai et al., 2013) ^c	1 m ³ de concreto convencional	20 MPa	227.91	0.960	0.324	0.013 ^e	1.160	6.93x10 ⁻⁰⁶
		25 MPa	240.96	1.003	0.340	0.014 ^e	1.223	7.17x10 ⁻⁰⁶
		30 MPa	319.68	1.291	0.448	0.016 ^e	1.588	8.37x10 ⁻⁰⁶
		35 MPa	297.56	1.205	0.416	0.015 ^e	1.488	7.96x10 ⁻⁰⁶
		40 MPa	317.90	1.269	0.439	0.016 ^e	1.597	8.37x10 ⁻⁰⁶
		45 MPa	391.09	1.532	0.538	0.019 ^e	1.935	9.43x10 ⁻⁰⁶
(Werner & Richter, 2007) ^c	1 m ³ de concreto convencional	50 MPa	443.05	1.730	0.615	0.019 ^e	2.153	1.01x10 ⁻⁰⁵
		20 MPa	220.30	0.622	0.190	0.014 ^e	0.727	9.81x10 ⁻⁰⁶
		25 MPa	221.85	0.624	0.186	0.014 ^e	0.743	1.01x10 ⁻⁰⁵
		30 MPa	309.59	0.816	0.257	0.019 ^e	0.986	1.25x10 ⁻⁰⁵
		35 MPa	320.97	0.828	0.252	0.019 ^e	1.034	1.29x10 ⁻⁰⁵
(F. B. Silva et al., 2019) ^c	1 m ³ de concreto convencional	40 MPa	284.60	1.137	0.242	0.034 ^e	1.026	2.04x10 ⁻⁰⁵

^c Adaptado por el autor en OpenLCA (CML-2001)

^d Resultados entre estudios no son comparables a que su objetivo y métodos son diferentes entre ellos.

^e Photochemical oxidation (summer smog) - low NO_x POCP

(Fuente: Adaptada por el autor de varios estudios)

CAPÍTULO 3

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Inventario de Emisiones: Comparación entre Emisiones por Factor de Emisión vs. Monitoreo continuo de emisiones en la fuente

Existen varios métodos para determinar las emisiones al aire de un proceso, cada una con sus ventajas y desventajas, su aplicación depende los recursos que se dispongan, equipamiento, disponibilidad de información, etc. Dependiendo del método seleccionado, la confiabilidad de la estimación es diferente. Los métodos disponibles para el cálculo son:

1. Monitoreo continuo de emisiones
2. Monitoreo en la fuente de varios parámetros
3. Monitoreo en la fuente puntual
4. Balance de Masa
5. Modelo de emisión de la fuente por industria
6. Factores Industriales/Estatales
7. Factores de Emisión
8. Criterio ingenieril.

EPA, 1995 indica que el método de monitoreo continuo de emisiones es el más confiable pero el más costoso, seguidos de métodos paramétricos y mediciones puntuales en confiabilidad y costos, balance de masa, modelos de emisión, los factores de emisión e industriales son los menos costosos pero su confiabilidad depende de su correcta aplicación e interpretación, el criterio ingenieril es el menos costoso y el menos confiable como lo indica la [Figura 3.1](#).

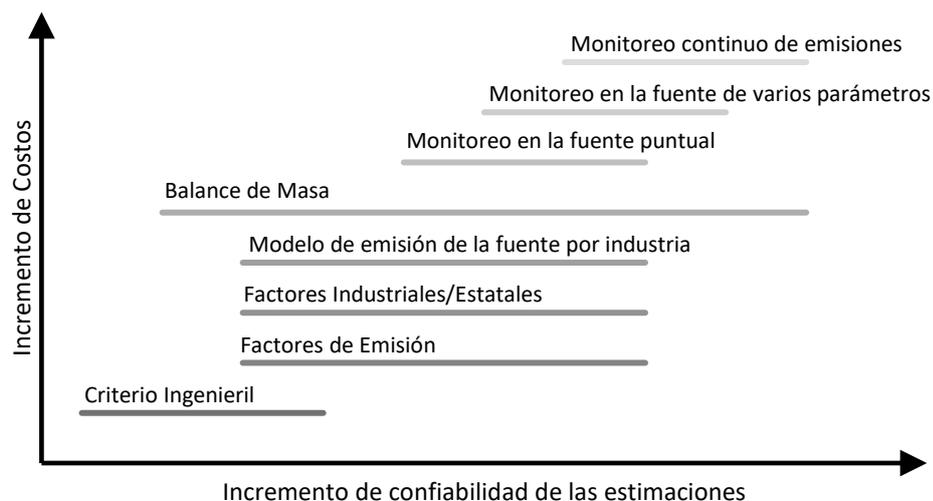


Figura 3.1 Sensibilidad de los métodos de estimación de emisiones
(Fuente: EPA, 1995)

Con la finalidad de comparar el monitoreo continuo de emisiones del caso de estudio, se define una metodología de revisión entre factores de emisión del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) para CO₂ y de la European Environment Agency (EEA) para NO_x, SO₂, PM y VOC contra la emisión de la sustancia obtenida mediante la medición continua de emisiones dividida para su unidad de producción.

3.1.1. Dióxido de carbono (CO₂)

La guía para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero de IPCC, 2006 recomienda seleccionar una de sus tres metodologías dependiendo de la naturaleza de los datos disponibles. El Tier 1 utiliza como valor de contenido de 65% Óxido de calcio (CaO) en el clinker mientras que el Tier 2 utiliza datos de producción de clinker y fracción de calcio para estimar el contenido de CaO. De acuerdo con Gibbs Michael J et al., 2001 la diferencia entre ambos métodos se estima mínima.

Se utiliza Tier 1 en este estudio, el valor de contenido de Óxido de calcio (CaO) en el clinker se lo estima en 65%, se asume que el 100% del CaO proviene del carbonato de calcio (CaCO₃) y se incorpora un factor de corrección de 2% por Cement Kiln Dust (CKD). Con esta premisa, 1 ton de clinker contiene 0.65 ton de CaO, la distribución de este carbonato es 56.03% de CaO y 43.97% de CO₂ másicamente (IPCC, 2006). Esto se resume en la siguiente ecuación:

$$FE_K = \frac{0.65 \text{ ton CaO}}{1 \text{ ton de clinker}} * \frac{0.4397 \text{ ton CO}_2}{0.5603 \text{ ton CaO}} * 1.02 \text{ (Corrección por CKD)} \quad (1)$$

$$FE_K = 520 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{ton de clinker}} \quad (2)$$

Adicional se considera el CO₂ proveniente de la combustión, para esto se usa el factor de emisión disponible para Petroleum Coke de FE=97.5 kg CO₂/GJ. Utilizando los valores de energía térmica promedio por unidad de clinker y se calcula el factor de emisión por unidad de clinker.

$$FE_{\text{combustión}} = 3.01 \frac{\text{GJ}}{1 \text{ ton de clinker}} * 97.5 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{GJ}} \quad (3)$$

$$FE_{\text{combustión}} = 293.47 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{ton de clinker}} \quad (4)$$

El factor de emisión final para el CO₂ en el proceso de clinkerización se lo estima como la suma de FE_K y FE_{combustión}:

$$FE_{\text{Clinkerización}} = 520 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{ton de clinker}} + 293.47 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{ton de clinker}} \quad (5)$$

$$FE_{\text{Clinkerización}} = 813 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{ton de clinker}} \quad (6)$$

3.1.2. Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Dióxido de Azufre (SO₂), Material Particulado (PM) y Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC)

La guía de inventario de emisión de contaminantes atmosféricos de EEA, 2019 propone los siguientes factores de emisión para los contaminantes seleccionados por unidad de clinker en el capítulo 1.A.2.f.i Combustión estacionaria en industrias de manufactura y construcción: Otros.

TABLA 10
FACTORES DE EMISIÓN DEL EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY
PARA LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO

Componente	Factor de Emisión
NO _x	1.241 $\frac{kg NO_x}{ton de clinker}$
SO _x	0.374 $\frac{kg SO_x}{ton de clinker}$
VOC	0.018 $\frac{kg VOC}{ton de clinker}$

(Fuente: EEA, 2019)

El capítulo 2.A.1 Producción de cemento, para contaminantes específicos como el material particulado (PM) recomienda utilizar la siguiente ecuación:

$$FE_{t2} = (1 - \eta_2) * FE_1 \quad (7)$$

Donde FE_{t2} es el factor de emisión después de aplicar una tecnología de control, η_2 es la eficiencia del control y FE_{t1} es el factor de emisión sin la tecnología de control. El factor de emisión sin la tecnología de control de PM para la producción de cemento es 0.260 kg PM/ton clinker y la eficiencia de los controles aplicados es de 0.8 (EEA, 2019), aplicando la [Ecuación 7](#), se obtiene el siguiente resultado:

$$FE_{t2} = (1 - 0.8) * 0.260 \frac{kg PM}{ton de clinker} \quad (8)$$

$$FE_{PM} = 0.052 \frac{kg PM}{ton de clinker} \quad (9)$$

3.1.3. Sistema de medición en la fuente

Para el monitoreo y reporte de las emisiones del caso de estudio, se utiliza una herramienta estándar que permite datos continuos de información ambiental, acorde a la normativa ISO 10396:2007 Emisiones de fuentes estacionarias. Muestreo para la determinación automática de concentraciones de gas de emisión para sistemas de medida instalados permanentemente (ISO, 2006a).

Los equipos miden de manera continua los siguientes parámetros:

TABLA 11
PARÁMETROS AMBIENTALES MONITOREADOS EN LA FUENTE

Parámetro	Unidades
O ₂	%
H ₂ O	%
T	°C
Dust	mg/m ³
SO ₂	ppm
NO	ppm
NO ₂	ppm
CO ₂	ppm
VOC	mg/m ³
HCl	ppm
HF	ppm

(Fuente: El Autor)

Estos parámetros son resultantes de mediciones continuas en base a promedios diarios, mensuales y anuales.

Este estudio basa su cálculo del volumen de gases en la siguiente ecuación:

$$\dot{V} \left[\frac{m_{N,dry}^3}{kg \text{ Clinker}} \right] = (0,25 * q + 0,27) \left(1 + \frac{O_{2 \text{ reference}}}{(21 - O_{2 \text{ reference}})} \right) \quad (10)$$

Dónde:

q = Cantidad de energía utilizada en el horno en MJ sobre kg de Clinker producido.

$O_{2 \text{ reference}}$ = Oxígeno de referencia de 10%.

Con los parámetros de concentración en ppm, O₂, humedad y temperatura, se determina la concentración de los contaminantes atmosféricos en condición seca y normalizada, para la comparativa de este estudio, se la realiza verificando los factores de emisión vs. la producción de contaminantes medidos en la fuente divididos para la unidad de clinker, por lo que al resultado de concentración de contaminante se la multiplica por el volumen de gas para unidad de clinker calculado con la [Ecuación 10](#), el resultado de Medición Continua de Emisiones (EM) se lo expresa en kg de contaminante para ton de clinker.

$$EM \left[\frac{kg \text{ contaminante}}{ton \text{ de clinker}} \right] = C \left[\frac{kg \text{ contaminante}}{m_{N,dry}^3} \right] * \dot{V} \left[\frac{m_{N,dry}^3}{ton \text{ de clinker}} \right] \quad (11)$$

3.2. Análisis de Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida es una herramienta que permite obtener resultados cuantitativos, evaluando el desempeño ambiental de un servicio o producto en cada una de sus etapas de su ciclo de vida. Dicho proceso es posible mediante la compilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales todo el sistema.

El uso de ACV con el paso del tiempo, en la comunidad científica, ha sido muy útil para evaluar el desempeño del uso de materiales y energía de un sistema, las variaciones de los niveles de eficiencia ambiental entre los procesos, generando líneas base para futuras mejoras con miras a la ecoeficiencia (Ross et al., 2002). Dado al creciente interés de los grupos gubernamentales en los impactos ambientales de la industria, el ACV ha sido muy utilizado para la generación de declaraciones ambientales de producto (EPD) particularmente en la fabricación de materiales (Sartori et al., 2021).

El ACV está basado en los lineamientos de ISO 14040-14044, donde se describe cuatro pasos para el desarrollo del mismo, cada etapa puede ser modificada en cualquier parte del estudio como lo muestra la [Figura 3.2](#), los pasos descritos en la normativa son (ISO, 2006b):

1. Definición de Objetivos y Alcance.
2. Análisis de Inventario de Ciclo de Vida.
3. Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida.
4. Interpretación de Ciclo de Vida.

Un ciclo de vida incluye etapas como extracción de materias primas, producción, componentes del producto y el producto como tal, uso y reciclaje o disposición final. Es importante denotar que no es necesario elaborar un ACV tomando en cuenta todas sus etapas, se puede ajustar a las necesidades del proyecto.



Figura 3.2 Marco de Evaluación de Ciclo de Vida - ISO 14040
(Fuente: ISO, 2006)

3.2.1. Alcance

Los siguientes materiales y procesos se incluyeron en los límites del sistema, que corresponden a diferentes módulos de información definidos por la norma EN 15804 (CEN, 2020) como se muestran en la [Tabla 12](#), los módulos de información incluidos en el límite del sistema son Fase de Producción (A1-A3), incluye procesos relacionados con (i) extracción y procesamiento de materias primas vírgenes, (ii) procesamiento de materias primas y (iii) transporte de materias primas al fabricante y fabricación del producto.

TABLA 12 ALCANCE DE PRODUCTOS ACORDE A NORMATIVA EN 15804

Fase de Producción			Fase de Construcción		Fase de Uso								Fase de Fin de Vida				Beneficios y cargas para el próximo sistema de productos
Suministro de materia prima	Transporte	Fabricación	Transporte	Proceso de construcción / instalación	Utilización	Mantenimiento incluido transporte	Reparación incluido transporte	Reemplazo incluido transporte	Rehabilitación incl. transporte	Uso de energía en operación	Uso de agua en operación	Demolición	Transporte	Reutilizar el reciclaje	Disposición final	Reutilización, recuperación potencial de reciclaje	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

(Fuente: EN 15804)

3.2.1.1. Fabricación de clinker

El alcance para este producto, temporalmente se utilizan datos del año 2019 y geográficamente el clinker utilizado para la producción del 62.8% del cemento en el Ecuador. La unidad funcional es 1 tonelada de clinker y el límite del sistema es de la cuna a la puerta (cradle to gate), se considera extracción y transporte de materia prima, combustibles y misceláneos, las emisiones consideradas en el [Capítulo 3.1](#) y residuos sólidos. Se excluye aprovechamiento de combustibles alternativos y materiales cementicios complementarios que son residuos de otras industrias.

3.2.1.2. Fabricación de cemento

El alcance definido para la fabricación del cemento, temporalmente datos del año 2019, geográficamente la producción del 62.8% del cemento del Ecuador. La unidad funcional para el cemento hidráulico compuesto es 1 tonelada de cemento GU, 1 tonelada de cemento HE y 1 tonelada de cemento MH, de acuerdo con la normativa ASTM C1157 y el límite del sistema es de la cuna a la puerta, se excluye empaque.

3.2.1.3. Fabricación de concreto premezclado

Se utilizan datos de 10 plantas de concreto ubicadas en Guayaquil, Quito, Manta, Machala, Cuenca y Ambato, abarcando un 55% de la producción de concreto del Ecuador, la unidad funcional es 1 m³ de concreto premezclado (RMX) y el límite del sistema es de la cuna a la puerta, se incluye reciclaje excluye transporte de concreto a obra. La [Figura 3.3](#) representa el diagrama de flujo de los tres productos analizados.

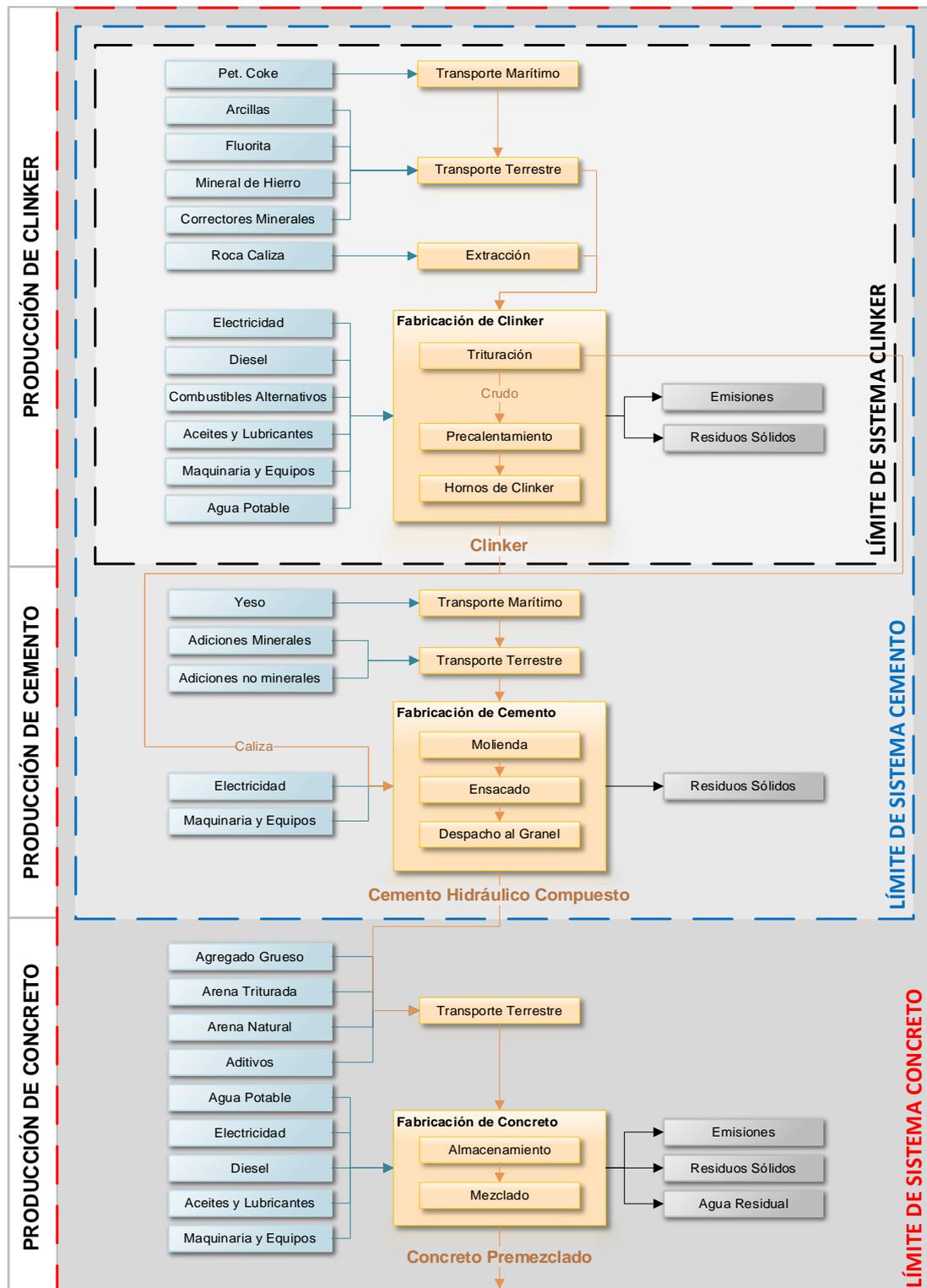


Figura 3.3 Límites del sistema y alcance de procesos de fabricación de clinker, cemento y concreto (Fuente: El Autor)

3.2.2. Construcción de análisis de inventario

A lo largo del alcance del estudio, se utilizó bases de datos para flujos de entrada y salida disponibles en Ecoinvent 3.7.1, estos flujos se diferencian de acuerdo con su origen como Materias Primas, Combustibles y energías, Misceláneos, Residuos, Emisiones al aire y Producto como lo observado en la [Tabla 13](#), [Tabla 14](#) y [Tabla 15](#).

3.2.2.1. Procesos tomados de bases de datos

Los principales componentes del proceso de elaboración del clinker son la caliza, arcilla y correctores minerales, estos procesos fueron tomados de la base de datos disponible teniendo en cuenta el transporte desde cada fábrica, estos procesos se reflejan como “production” u “operation” con datos de producción generales de resto del mundo (RoW) o Global (GLO).

El proceso de transporte en camión >32 toneladas, EURO3 es colocado para movilización de arcilla, caliza, escoria de acero, escoria de cobre, fluorita, mineral de hierro, diésel, petroleum coke, biomasa, aceites usados, residuos sólidos municipales. Para los procesos escoria de cobre, fluorita y petroleum coke se define transporte, marítimo, al granel para productos secos, mientras que para las materias primas y combustibles en estado sólido se coloca el transporte en bandas, este proceso fue adaptado de “transport, freight, conveyor belt | transport, freight, conveyor belt without electricity | APOS, U - GLO” quitando su electricidad ya que esta es considerada en el inventario general de consumos de energía eléctrica en la producción de clinker.

Para el agua potable se utiliza Tap Water disponible para Perú (PE) ya que posee un sistema de abastecimiento de agua similar al de Ecuador y en producción de Diésel se toma el proceso de producción de Colombia por la similar refinación y cercanía geográfica.

TABLA 13 RESUMEN DE PROCESOS TOMADOS DE LA BASE DE DATOS ECOINVENT PARA LA ELABORACIÓN DE CLINKER EN EL ECUADOR

Flujo de entrada/salida	OpenLCA - Ecoinvent database
Materias Primas	
Arcilla	clay pit operation clay APOS, U - RoW
Caliza	limestone production, crushed, for mill limestone, crushed, for mill APOS, U - RoW
Escoria de Acero	electric arc furnace slag
Escoria de Cobre	copper slag
Fluorita	fluorspar production, 97% purity fluorspar, 97% purity APOS, U - GLO
Mineral de Hierro	iron ore mine operation, 46% Fe iron ore, crude ore, 46% Fe APOS, U - GLO

Combustibles y energías	
Aceite y lubricantes	market for lubricating oil lubricating oil APOS, U - RoW
Diésel	diesel production, low-sulfur, petroleum refinery operation diesel, low-sulfur APOS, U - CO
Petroleum Coke	petroleum coke production, petroleum refinery operation petroleum coke APOS, U - RoW
Biomasa	Biowaste
Aceites usados	Waste mineral oil
Residuos sólidos municipales	Municipal solid waste
Misceláneo	
Acero 18/8, hot rolled	market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled steel, chromium steel 18/8, hot rolled APOS, U - GLO
Agua Potable	market for tap water tap water APOS, U - PE
Fábrica de Cemento	market for cement factory cement factory APOS, U - GLO
Ladrillo refractario, basic, packed	market for refractory, basic, packed refractory, basic, packed APOS, U - GLO
Ladrillo refractario, fireclay, packed	market for refractory, fireclay, packed refractory, fireclay, packed APOS, U - GLO
Ladrillo refractario, high aluminium oxide, packed	market for refractory, high aluminium oxide, packed refractory, high aluminium oxide, packed APOS, U - GLO
Maquinaria Industrial	market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified APOS, U - RoW
Transporte	
Transporte, Camión >32 toneladas, EURO3	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 APOS, U - RoW
Transporte, Marítimo, al granel para productos secos	transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods APOS, U - GLO
Transporte, bandas	transport, freight, conveyor belt transport, freight, conveyor belt without electricity APOS, U - GLO

(Fuente: OpenLCA 1.10.3 – Ecoinvent 3.7.1)

Procesos reflejados como “market” son aquellos con los que no se cuentan con información de transporte y por su bajo consumo e impacto se los puede generalizar

como RoW o GLO con un transporte promedio definido por la base de datos. Para el proceso de elaboración del cemento en el Ecuador, la principal materia prima es el clinker y se utiliza generado en este estudio, las otras materias primas se toman de Ecoinvent 3.7.1 a nivel RoW o GLO, como lo refleja la [Tabla 14](#).

Se considera transporte marítimo, al granel para productos secos para la movilización de yeso. Transporte por camión >32 toneladas, EURO3 para trasladar yeso y caliza, por último, transporte de bandas para trasladar clinker, yeso y caliza, este proceso fue adaptado de transport, freight, conveyor belt | transport, freight, conveyor belt without electricity | APOS, U - GLO quitando el consumo de electricidad ya que este está incluido en el inventario de energía eléctrica del proceso de producción de cemento.

TABLA 14 RESUMEN DE PROCESOS TOMADOS DE LA BASE DE DATOS ECOINVENT PARA LA ELABORACIÓN DE CEMENTO EN EL ECUADOR

Flujo de entrada/salida	OpenLCA - Ecoinvent database
Materias Primas	
Clinker	Este estudio
Yeso	gypsum quarry operation gypsum, mineral APOS, U - RoW
Caliza	limestone production, crushed, for mill limestone, crushed, for mill APOS, U - RoW
Misceláneo	
Fábrica de Cemento	market for cement factory cement factory APOS, U - GLO
Acero de baja aleación	market for steel, low-alloyed steel, low-alloyed APOS, U - GLO
Transporte	
Transporte, Camión >32 toneladas, EURO3	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 APOS, U - RoW
Transporte, Marítimo, al granel para productos secos	transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods APOS, U - GLO
Transporte, bandas	transport, freight, conveyor belt transport, freight, conveyor belt without electricity APOS, U - GLO

(Fuente: OpenLCA 1.10.3 – Ecoinvent 3.7.1)

En el proceso de fabricación del concreto, nuevamente como materia prima principal se utiliza cemento hidráulico compuesto creado en este estudio, el agua potable se la toma de inventario de Perú y los demás procesos son RoW y GLO, disponibles en Ecoinvent 3.7.1 como lo muestra la [Tabla 15](#). Las materias primas, cemento, agregados y aditivos son transportados desde sus fábricas, para modelar el

transporte se considera el proceso de transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3. El consumo de energía eléctrica es tomado de la red nacional, todas las plantas cuentan con generadores adicionales con capacidades entre 100 y 1000 kW que funcionan a diésel, esto se lo modela con un proceso similar disponible en Ecoinvent.

TABLA 15 RESUMEN DE PROCESOS TOMADOS DE LA BASE DE DATOS ECOINVENT PARA LA ELABORACIÓN DE CONCRETO RMX EN ECUADOR

Flujo de entrada/salida	OpenLCA - Ecoinvent database
Materias Primas	
Cemento Hidráulico Compuesto	Este estudio
Agregado Grueso	gravel production, crushed gravel, crushed APOS, U - RoW
Arena Natural	sand quarry operation, extraction from river bed sand APOS, U - RoW
Arena Triturada	gravel and sand quarry operation sand APOS, U - RoW
Agua Potable	market for tap water tap water APOS, U - PE
Aditivos de Concreto	chemical production, organic chemical, organic APOS, U - GLO
Combustibles y energías	
Diésel (Maquinarias)	diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine APOS, U - GLO
Diésel (Generador Eléctrico)	diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW APOS, U - GLO
Misceláneos	
Aceites	lubricating oil production lubricating oil APOS, U - RoW
Caucho sintético	market for synthetic rubber synthetic rubber APOS, U - GLO
Fábrica de Concreto	market for concrete mixing factory concrete mixing factory APOS, U - GLO
Acero de baja aleación	market for steel, low-alloyed, hot rolled steel, low-alloyed, hot rolled APOS, U - GLO
Transporte	
Transporte, Camión >32 toneladas, EURO3	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 APOS, U - RoW

(Fuente: OpenLCA 1.10.3 – Ecoinvent 3.7.1)

3.2.2.2. Procesos tomados de literatura científica

Para los tres procesos abarcados en el alcance, se utiliza los resultados de electricidad creados por Ramirez et al., 2020 quienes realizan un análisis de ciclo de vida abarcando todos tipos de centrales energéticas disponibles en el país, tomando el balance energético nacional del 2018.

Flujo de entrada/salida	Referencia Bibliográfica
Electricidad	(Ramirez et al., 2020)

3.2.2.3. Metodología de compilación de inventario de procesos creados para este estudio

Materias Primas, Combustibles y energías

Los consumos de materias primas de cemento y clinker, se obtuvieron de reportes de sostenibilidad, los mismos que muestran consumos en las unidades mostradas, estos valores fueron verificados en un levantamiento de información in-situ.

La empresa analizada cuenta con un sistema contable que lleva registro de consumos de materias primas, combustibles y energía eléctrica en cada fase del proceso el cual fue proporcionado para desarrollar el inventario y los procesos unitarios de acuerdo a la normativa ISO 14044 (ISO, 2006b). La energía térmica utilizada se la calcula a partir de ensayos mensuales de capacidad calorífica de los combustibles y residuos utilizados como combustibles alternos.

Para el levantamiento de información de concreto premezclado se lo realiza en las principales ciudades del Ecuador, se analiza 3 plantas de Guayaquil y sus alrededores, 3 plantas de Quito y sus alrededores. En Cuenca, Machala, Ambato y Manta se analiza 1 planta para cada ciudad.

Emisiones al Aire

Se realiza un levantamiento mensual de concentraciones de emisiones de CO₂, NO_x, SO₂, PM y VOC del sistema de monitoreo de emisiones de cada horno operativo de clinkerización, posterior utilizando la [Ecuación 10](#) para el cálculo de volumen de gas emitido y la producción se puede obtener las emisiones de cada contaminante para la unidad funcional (1 ton de clinker). Estos resultados son comparados con el uso de factores de emisión mediante la metodología descrita en la [Sección 3.1](#).

Emisiones como amoníaco, antimonio, arsénico, benceno, cadmio, cloruro de hidrogeno, cobalto, cobre, cromo, dioxinas, mercurio, monóxido de carbono, níquel, plomo, talio y vanadio son tomados de mediciones bianuales a cada horno de las operaciones.

Misceláneo

Datos como la instalación de las plantas de clinker, cemento y concreto se calcularon a partir de la producción y la vida útil de las mismas, consumo de acero, aceites, maquinaria pesada y equipos de mantenimiento fueron tomados del registro contable y logístico de las plantas.

Residuos

Los residuos sólidos generados son retirados por la empresa municipal de turno y su masa es registrada por los balancines de la planta, lo que permite tener un registro contable de la cantidad generada, misma que es utilizada para este estudio.

Transporte

Para las principales materias primas y su transporte en los procesos de producción de clinker, cemento y concreto de cada ciudad, se determina la ubicación de las fábricas de los proveedores, posterior se genera una ruta óptima mediante el uso de herramientas de sistemas de posicionamiento global (GPS). Mediante el uso de la información de pesos de materias primas obtenidos previamente, se expresa el transporte en unidades t*km.

3.2.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida

El método de análisis de impactos que se utiliza es ReCiPe Midpoint (H) V1.13, desarrollado por primera vez en 2008 a través de la cooperación entre Instituto Nacional Holandés de Salud Pública y Medio Ambiente (RIVM), Radboud University Nijmegen, Leiden University y PRé Sustainability (Goedkoop et al., 2013), para este estudio se consideran las siguientes categorías de impacto:

1. Climate change - GWP100
2. Terrestrial acidification - TAP100
3. Freshwater eutrophication - FEP
4. Marine eutrophication - MEP
5. Ozone depletion - ODPinf
6. Photochemical oxidant formation - POFP
7. Particulate matter formation - PMFP
8. Fossil depletion - FDP

Climate change - GWP100: Impacto producido por las emisiones atmosféricas que contribuyen al efecto invernadero. El cambio climático comienza con la emisión de un gas de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera (Isaksen et al., 2012). El aumento de la concentración de GEI hace que aumente la capacidad de forzamiento radiativo de la atmósfera, lo que hace que una mayor parte de la energía solar se retenga en la atmósfera (Pulselli & Marchi, 2015). Esto hace que la temperatura global aumente, afectando así la salud humana (Gulcebi et al., 2021) y los ecosistemas naturales (Bao

et al., 2021; Godde et al., 2021; Vallero & Letcher, 2013). Unidad de referencia: kg de CO₂ equivalentes.

Terrestrial acidification - TAP100: La acidificación terrestre se caracteriza por cambios en las propiedades químicas del suelo después de la deposición de nutrientes (nitrógeno y azufre) en formas acidificantes. En esta categoría se evalúa el impacto ambiental de los óxidos de nitrógeno (NO_x), amoníaco (NH₃) y dióxido de azufre (SO₂) por ende la disminución del pH del suelo (Falkengren-Grerup, 1986; Velázquez-Martí et al., 2017). El aumento de la concentración de nutrientes acidificantes en el suelo conduce a la disminución de la saturación de bases y el aumento de aluminio disuelto. Esto provoca una disminución en la fertilidad del suelo (Forster, 2003; Zvereva et al., 2008) que puede conducir a un aumento en el amarilleo del tejido vegetal, fallas en la germinación de las semillas y una disminución en la producción de nuevas raíces, reduciendo así las tasas de fotosíntesis, la biomasa de las plantas y en casos extremos la diversidad de las plantas (Roem & Berendse, 2000). La unidad de referencia es kg SO₂ equivalentes.

Freshwater eutrophication - FEP: La eutrofización del agua dulce se produce debido a la descarga de nutrientes en el suelo o en cuerpos de agua dulce y su consiguiente aumento de los niveles de nutrientes (fósforo y nitrógeno) (Damanik-Ambarita et al., 2016; Y. Li et al., 2021). Los impactos ambientales de la eutrofización del agua dulce se inician con el aumento de la productividad primaria por una mayor absorción de nutrientes por parte de organismos autótrofos, lo que provoca un aumento de la turbidez y olor en el agua, posteriormente la descomposición de la materia orgánica y el agotamiento del oxígeno disuelto, esto último es particularmente perjudicial para organismos heterótrofos (Ding et al., 2021). El agotamiento de la luz solar causado por el aumento de la turbidez del agua también aumenta la competencia por la luz por parte de los organismos fotosintetizadores lo que, en algunos casos, puede conducir a la síntesis de sustancias tóxicas (aleloquímicos) por la competencia de fitoplancton (Carpenter et al., 1998). En última instancia, pueden provocar pérdidas de biodiversidad (Struijs et al., 2011). La unidad de medida es kg de P equivalentes.

Marine eutrophication - MEP: La eutrofización marina se puede definir como una respuesta del ecosistema marino a la mayor disponibilidad de un nutriente limitante en la zona costera de las aguas marinas. Muchos estudios suponen que el nitrógeno (N) es el nutriente limitante en las aguas marinas (Paerl & Piehler, 2008). A nivel mundial, las emisiones antropogénicas de N al medio ambiente se han multiplicado por más de 10 en los últimos 150 años, principalmente debido a la escorrentía y lixiviación (emisiones de N transmitidas por el agua) y los procesos de combustión (emisiones de N transmitidas por el aire) (De Paula Filho et al., 2015; Kowalkowski et al., 2012). Esta categoría de impacto se limita a las cargas en el agua de las actividades humanas en aguas marinas costeras aumentando su concentración de N (Henryson et al., 2020).

El aporte de N a las aguas costeras marinas es asimilado por los productores primarios (principalmente fitoplancton), lo que promueve el aumento de la biomasa planctónica (Ménèsquen & Lacroix, 2018). La materia orgánica sintetizada finalmente

se transporta a las aguas del fondo donde su respiración aeróbica por bacterias heterótrofas conduce al consumo de oxígeno disuelto (Desmit et al., 2018). Si cantidades excesivas de carbono orgánico alcanzan la capa bentónica (inferior), el oxígeno disuelto puede caer a niveles hipóxicos o anóxicos, lo que puede conducir a la pérdida de la diversidad de especies (Cosme et al., 2015; Kitsiou & Karydis, 2011). La unidad de medida es kg de N equivalentes.

Ozone depletion - ODPinf: La capa de ozono en la estratosfera absorbe una gran parte de la radiación ultravioleta dañina proveniente del sol. En condiciones naturales, el ozono se forma y destruye continuamente (Lucas et al., 2019). Sin embargo, una serie de sustancias químicas artificiales que contienen flúor, bromo y grupos de cloro (CFCs, HCFCs, etc.), denominadas Ozone-Depleting Substances (Sustancias que agotan la capa de ozono), pueden aumentar considerablemente la tasa de destrucción, lo que lleva a una reducción del grosor de la capa de ozono (Reimann et al., 2018; Singh & Bhargawa, 2019). Con el espesor de la capa reducido, más radiación UV llegará a la superficie de la tierra. Una mayor exposición a la radiación UV puede provocar efectos adversos para la salud humana, como cáncer de piel y cataratas, y efectos sobre los ecosistemas (Karentz et al., 2018; Paul, 2000; Van der Leun, 1988). La unidad de medición es kg CFC-11 equivalentes.

Photochemical oxidant formation - POFP: La formación de ozono comienza con la emisión de NO_x o VOC a la atmósfera, seguido de su distribución atmosférica y la química del aire, los NO_x y los VOC se transforman en el aire en ozono (Dimitriades, 1989; Fowler et al., 1999). Posteriormente, este ozono troposférico puede ser inhalado por los humanos o absorbido por las plantas, provocando un mayor número de casos de mortalidad y daño final a la salud humana (World Health Organization, 2013), así como la desaparición de especies vegetales y daño final a los ecosistemas terrestres (Van Goethem et al., 2013). La unidad de medición es kg de NMVOC equivalentes.

Particulate matter formation - PMFP: La formación de material particulado comienza con la emisión de NO_x , NH_3 , SO_2 o PM primario a la atmósfera, seguido de su distribución atmosférica y la química del aire, el NO_x , NH_3 y SO_2 se transforman en el aire en aerosoles secundarios. Posteriormente, la población humana puede inhalar estos aerosoles en forma de PM, lo que aumenta el número de casos de mortalidad y daña la salud humana. La unidad de reporte es kg PM_{10} equivalentes.

Fossil depletion - FDP: La producción de energía de la humanidad es el principal contribuyente a la liberación antropogénica de gases de efecto invernadero, en particular CO_2 a la atmósfera. Por ende, las emisiones antropogénicas de GEI y el calentamiento global inducido por el hombre están fundamentalmente vinculados a la producción futura de energía (Höök & Tang, 2013).

Las proyecciones de cómo se desarrollará el sistema energético mundial durante el próximo siglo y el control de los recursos fósiles son piedras angulares en la evaluación del cambio climático futuro causado por la humanidad (Day & Day, 2017). La unidad de medición es kg oil (petróleo: crudo, materia prima, 42 MJ por kg en el suelo) equivalentes (Goedkoop et al., 2013).

3.2.4. OpenLCA

La herramienta que se utiliza para el desarrollo de este estudio es OpenLCA 1.10.3, que es un software de código abierto para la evaluación de ciclo de vida y sostenibilidad. Se pueden realizar cálculo de análisis de ciclo de vida, costes de ciclo de vida y evaluación social (GreenDelta, 2021).

También el software entrega información detallada sobre los resultados de los cálculos y análisis; identificar los principales actores que generan impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida, por proceso, flujo o categoría de impacto, visualizar los resultados y ubicarlos regionalmente.

OpenLCA posee sistemas de calidad de datos, definidos por el usuario utilizando la matriz de Ecoinvent "Pedigree" o utilizando valores de incertidumbres estadísticas, esto para generar una simulación de Monte Carlo disponible en el software.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Comparación entre Emisiones por Factor de Emisión vs. Monitoreo continuo de emisiones en la fuente

La comparación entre las emisiones al aire se la realiza entre el promedio de los valores mensuales monitoreados continuamente contra el factor de emisión, adicional la [Figura 4.1](#) expone la variación mensual de las mediciones, se determina un valor máximo y mínimo, estos resultados se los utiliza como inventario de emisiones para realizar el análisis de ciclo de vida del clinker.

Dióxido de carbono (CO₂): Los resultados mensuales de emisiones de CO₂ por unidad de clinker mensuales por el método de medición continua permiten promediar un valor de 842.69 kg CO₂/ton clinker, el factor de emisión propuesto por IPCC es de 813 kg CO₂/ton clinker, el error relativo es de 3.52% y una desviación estándar de medición continua mensual de 22.64 kg CO₂/ton clinker.

Óxidos de Nitrógeno (NO_x): El promedio mensual de NO_x para el monitoreo continuo en la fuente corresponde a 1.61 kg NO_x/ton clinker, el calculado por el método de factores de emisión es de 1.24 kg NO_x/ton clinker, el error relativo entre ambos resultados es del 22.79%. El valor máximo mensual es de 2.00 kg NO_x/ton clinker y el mínimo de 1.21 kg NO_x/ton clinker.

Dióxido de Azufre (SO₂): El promedio mensual de emisiones de SO₂ por unidad de clinker para el monitoreo continuo en la fuente es 0.058 kg SO₂/ton clinker, el calculado por el método de factores de emisión es de 0.374 kg SO₂/ton clinker. Esto se debe a la composición química de la materia prima, la formación geológica de caliza en Ecuador posee un bajo contenido de azufre pirítico en comparación a la materia prima europea y al uso de combustibles alternativos con bajo contenido de azufre, esto permite una reducción sustancial en las emisiones de SO₂.

Material Particulado (PM): Se analiza el promedio de PM para el monitoreo continuo en la fuente mensual, el resultado es 0.00960 kg PM/ton clinker. El factor de emisión es 0.052 kg PM/ton clinker, el resultado estimado con el factor de emisión es cinco veces mayor que el determinado con del sistema de medición continua. Esto se debe en gran parte a los equipos de control existentes. Para distribuir las partículas por su tamaño, se utiliza el modelo de distribución del WBCSD-CSI EPD tool (Dauriat et al., 2014): 48% < 2.5 µm, 18% > 2.5 µm y < 10 µm, 34% > 10 µm.

Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC): El promedio de VOC para el monitoreo continuo en la fuente mensual es 0.0772 kg VOC/ton clinker. El factor de emisión es 0.018 kg VOC/ton clinker, el resultado del sistema de medición continua es cuatro veces mayor que el estimado con el factor de emisión.

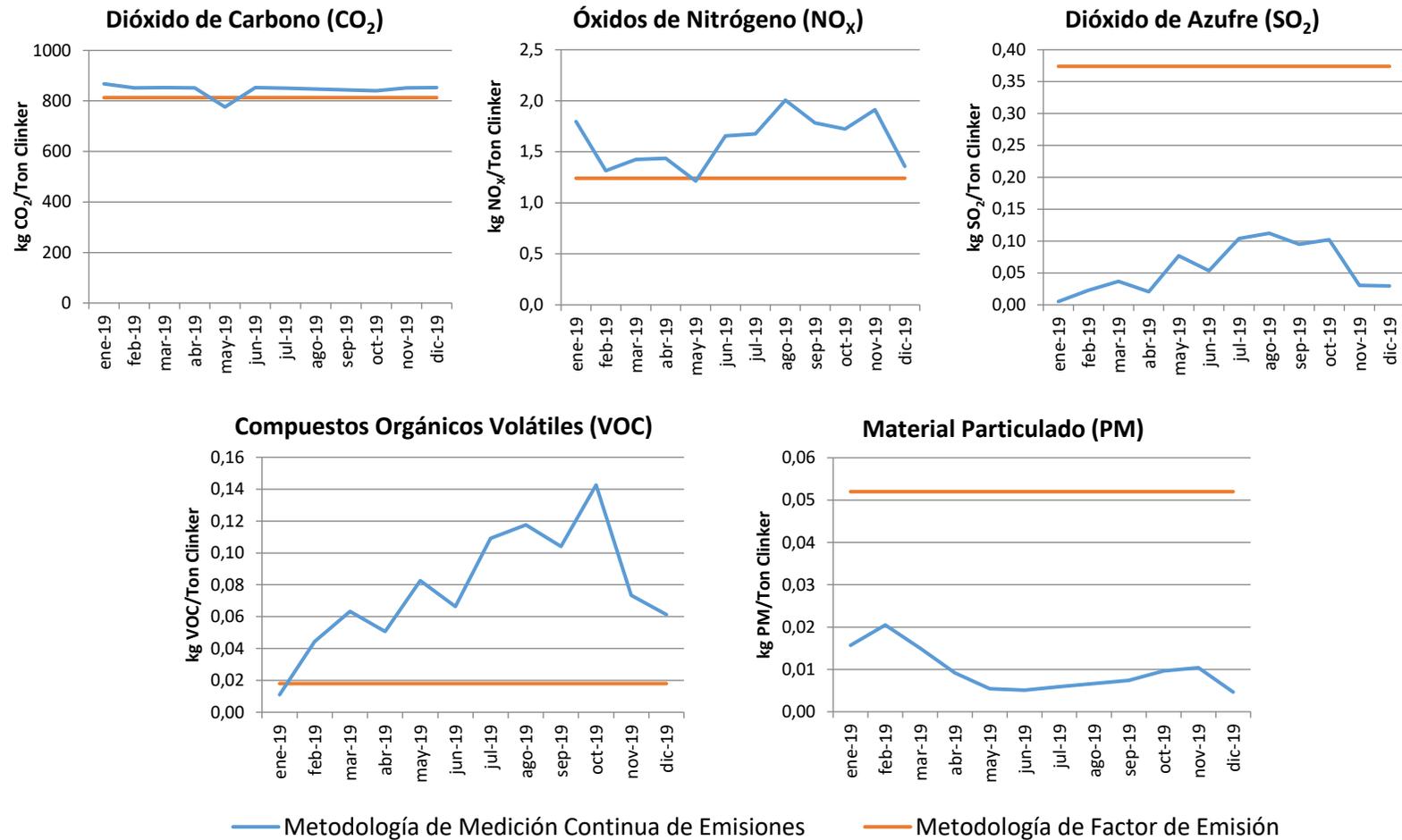


Figura 4.1 Comparación entre Metodología de Factores de Emisión y Metodología de emisiones medidas en la fuente por unidad funcional (Ton de clinker)
(Fuente: El Autor)

4.2. Inventarios creados para el sistema

La [Tabla 16](#) muestra los resultados de compilación de inventario visto en la [Sección 3.2.2.3](#), donde se detalla la cantidad requerida de cada flujo para producir 1 Ton. de clinker. Con estos resultados, se genera un diagrama de Sankey donde se muestra los consumos de materias primas en masa (kg), el consumo de energía eléctrica por cada etapa de proceso en kWh, adicional el consumo y aprovechamiento de la energía térmica de los combustibles convencionales y alternativos en MJ como se observa en la [Figura 4.2](#).

TABLA 16
FLUJOS DEL SISTEMA FABRICACIÓN DE CLINKER PARA LA UNIDAD
FUNCIONAL (1 TON DE CLINKER)

Flujo	Cantidad	Unidad
Entradas		
Materias Primas		
Limestone, crushed, for mill	1432.63	kg
Clay 1	175.44	kg
Clay 2	26.56	kg
Clay 3	6.36	kg
Clay 4	0.12	kg
Iron ore, crude ore, 46% Fe	0.41	kg
Fluorspar, 97% purity	0.18	kg
Copper slag	14.37	kg
Slag, unalloyed electric arc furnace steel	0.146	kg
Combustible y Energía Eléctrica		
Petroleum coke	88.91	kg
Diesel, low-sulfur	0.32	kg
Electricity, medium voltage	71.24	kWh
Combustibles Alternativos		
Biowaste	18.99	kg
Municipal solid waste	3.24	kg
Waste mineral oil	0.47	kg
Misceláneos		
Refractory, basic, packed	0.190	kg
Refractory, high aluminium oxide, packed	0.137	kg
Refractory, fireclay, packed	0.082	kg
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled	0.059	kg
Lubricating oil	0.047	kg
Tap water	2.76	kg
Industrial machine, heavy, unspecified	0.038	kg
Cement factory	9.45 x10 ⁻⁰⁹	Item(s)

Transporte		
transport, freight, conveyor belt	2.11	t*km
transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3	38.36	t*km
transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods	449.45	t*km
Salidas		
Emisiones al aire		
Carbon dioxide, fossil	842.69	kg
Nitrogen oxides	1.61	kg
Sulfur dioxide	0.058	kg
Particulates, < 2.5 um	0.0046	kg
Particulates, > 10 um	0.0033	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	0.0017	kg
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	0.077	kg
Ammonia	25.00	mg
Antimony	2.00	mg
Arsenic	5.90	mg
Benzene	88.00	mg
Cadmium	6.00	mg
Carbon monoxide, fossil	0.875	kg
Chromium	8.80	mg
Cobalt	11.80	mg
Copper	14.70	mg
Hydrogen chloride	13.50	mg
Lead	17.60	mg
Mercury	2.80	mg
Nickel	11.80	mg
Thallium	6.00	mg
Vanadium	17.60	mg
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	0.097	µg
Residuos sólidos		
Inert waste, for final disposal	0.179	kg
Municipal solid waste	0.044	kg

(Fuente: El Autor)

Para la producción de clinker, la caliza es el material más utilizado en el proceso y en menores proporciones en la fabricación de cemento, existe una porción de caliza rechazada de aproximadamente 0.01% que no cumple con los requerimientos químicos para ser utilizada como materia prima, como lo muestra la [Figura 4.2](#). Másicamente, el 86% del total de las materias primas está compuesta por caliza, se utilizan cuatro tipos de arcillas, que provienen de diferentes lugares del Ecuador, por lo que se las denomina Clay 1-4, estas arcillas representan un 11% en masa y otras materias primas de corrección mineral 3%.

De acuerdo con el resultado del Diagrama de Sankey ([Figura 4.2](#)), el proceso que consume mayor cantidad de energía eléctrica es el Horno/enfriador de clinker, seguido de los molinos de crudo. Másicamente, el uso de pet. coke y diésel como combustibles representa el 80%, mientras que el consumo de combustibles alternativos un 20%, en términos de energía, utilizando la capacidad calorífica de los combustibles, el pet. coke y el diésel representan el 91.1% de energía térmica y los combustibles alternativos un 8.9%.

La utilización de Cement Factory para 1 ton de clinker se lo calcula utilizando el promedio de la producción de los últimos 5 años y proyectando una vida útil de 50 años. El proceso de fabricación de clinker/cemento es seco y no consume agua como materia prima, exceptuando de agua utilizada en la maquinaria, misma que es liberada como vapor de agua.

Los resultados de la [Sección 4.1](#) correspondientes a inventarios de emisiones al aire son reportados en [Tabla 16](#), para Dióxido de Carbono (CO₂), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Dióxido de Azufre (SO₂), Material Particulado (PM) y Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC), en los resultados de otros gases y metales pesados se utiliza reportes de emisiones puntuales en la fuente, este resultado se lo calcula con la [Ecuación 11](#). Las emisiones al aire coinciden con los flujos naturales disponibles en OpenLCA.

El resultado de inventario de ciclo de vida para cementos hidráulicos compuestos del Ecuador no se lo muestra por acuerdo de confidencialidad con las empresas analizadas en este estudio.

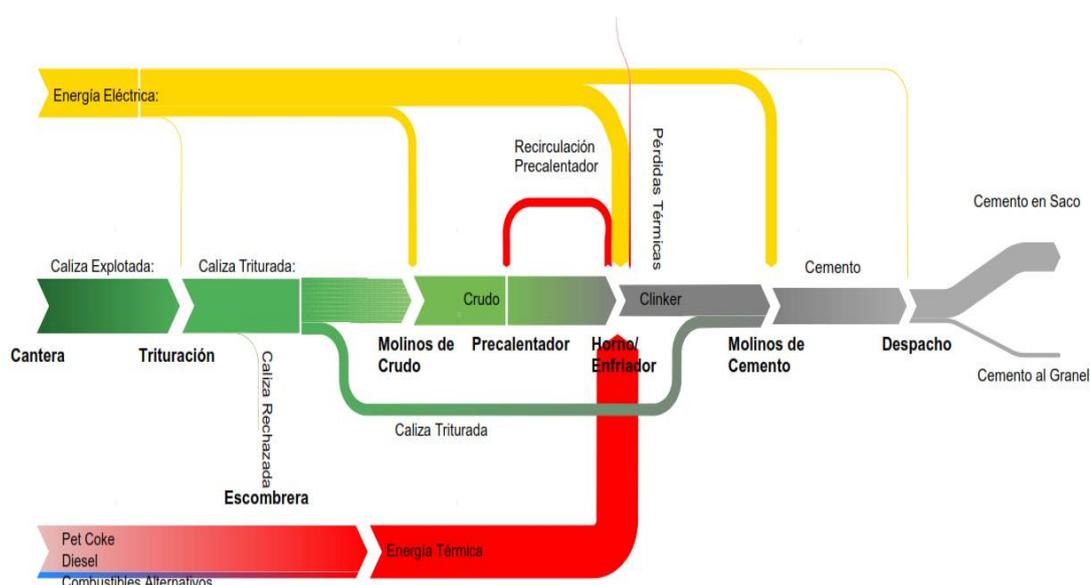


Figura 4.2 Diagrama de Sankey de la producción de clinker y cemento en el Ecuador
(Fuente: El Autor)

Se analizaron diez plantas de concreto premezclado repartidas en el Ecuador, tres en la capital Quito, tres en Guayaquil, una en Cuenca, una en Machala, una en Ambato y la última en Manta. La [Figura 4.3](#) muestra la distribución del volumen de concreto premezclado en el Ecuador tomado para este estudio, siendo la ciudad con mayor consumo Guayaquil, con un 38.1%, seguido de Quito con un 30.8%, otras ciudades como Cuenca, Machala, Ambato y Manta representan 10.2%, 8.4%, 6.5% y 6% respectivamente. Las plantas analizadas se encuentran en las ciudades con mayor cantidad de habitantes siendo el 47.07% de la población del Ecuador (INEC, 2010).

Las tres plantas analizadas en Quito suplen de concreto al Distrito Metropolitano de Quito con un índice de consumo de 0.17 ton de concreto/habitante, las tres plantas de Guayaquil abastecen a los cantones Guayaquil, Daule, Samborondón y Duran principalmente y a otras ciudades aledañas, el consumo de concreto es 0.17 ton de concreto/habitante, la planta ubicada en Cuenca entrega concreto en dicha cabecera cantonal con un consumo de 0.25 ton de concreto/habitante, la planta de Machala abarca las ciudades de Machala, Santa Rosa, Arenilla y El Guabo con un consumo de 0.28 ton de concreto/habitante, los habitantes de la ciudad de Ambato, con el análisis de la planta de esta ciudad consumen 0.26 ton de concreto/habitante y la planta de la ciudad de Manta abarca los cantones Manta, Montecristi y Portoviejo con un índice de consumo de 0.13 ton de concreto/habitante, este cálculo se lo realiza en base a proyecciones poblacionales para el año 2019 realizadas por INEC, 2012.

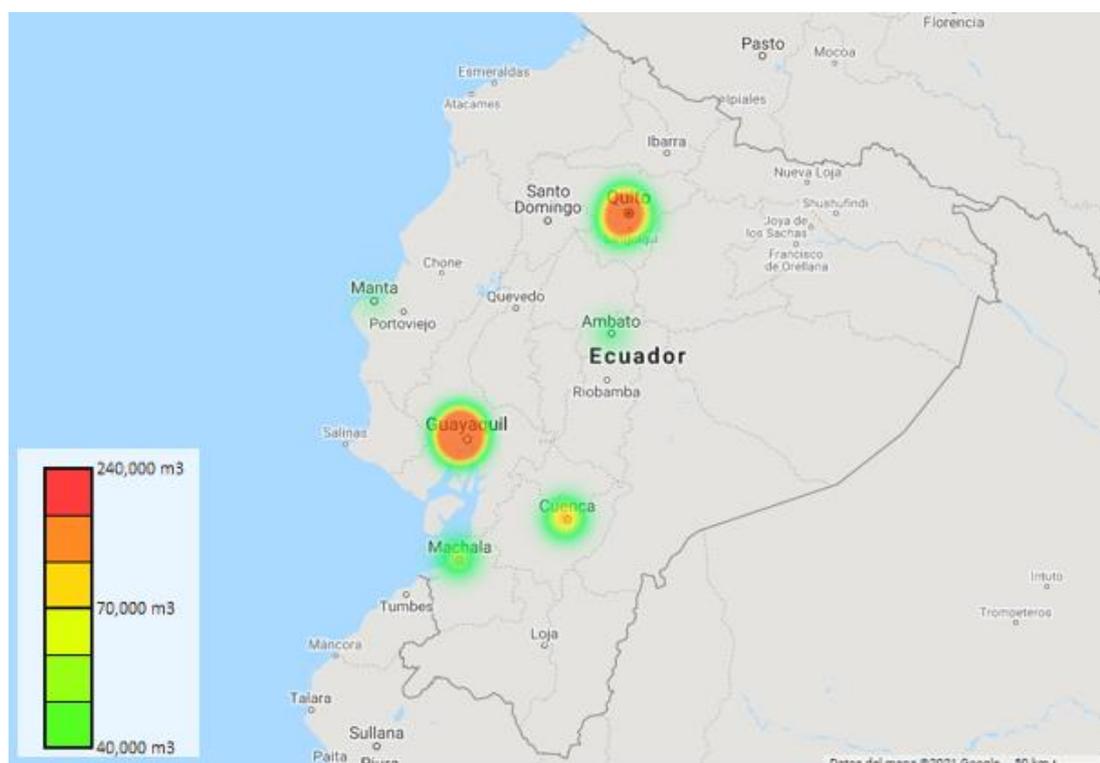


Figura 4.3 Distribución geográfica del volumen de concreto premezclado en el Ecuador

(Fuente: Adaptado de Google, 2021 por el autor)

De acuerdo con los resultados de la [Figura 4.4](#) y la clasificación de los concretos presentada en la [Sección 2.1.4](#), los concretos convencionales (18-40 MPa) son los más utilizados en la industria de la construcción en Ecuador con un 88% del total estudiado, mientras que los concretos alta resistencia (≥ 40 MPa) un 6.5% y los concretos de baja resistencia (≤ 18 MPa) un 5.5%.

El concreto más utilizado es de resistencia a la compresión de 28 MPa el cual representa un 22.5% de la producción nacional, el uso de este concreto es típico en la construcción de elementos como columnas, vigas y cimentaciones en edificaciones, seguido de 21 MPa con un 20.1%, este utilizado comúnmente en la construcción de losas.

Concretos de resistencias mayores a 50 MPa son despachados en gran medida por las plantas de la ciudad de Guayaquil, el concreto de 80MPa siendo exclusivo de esta ciudad, estos concretos son utilizados en grandes proyectos como cimentaciones profundas, puentes y concretos de alta resistencia inicial, los concretos entre 40-50 MPa son despachados en todas las plantas de análisis, estos son ocupados para la construcción de edificaciones de gran altura. Los concretos entre 30-40 MPa son utilizados en obras viales en su gran parte, ciudades como Machala, Cuenca, Quito y Guayaquil poseen un porcentaje significativo de estos concretos.

Se evidencia un uso representativo de concretos de baja resistencia en las ciudades de Quito, Cuenca y Guayaquil. Se observa una distribución similar en el porcentaje de participación en la producción de concretos convencionales entre 18-28 MPa, utilizados en la construcción de viviendas, tanto para personas que construyen una sola casa como para constructoras de planes habitacionales.

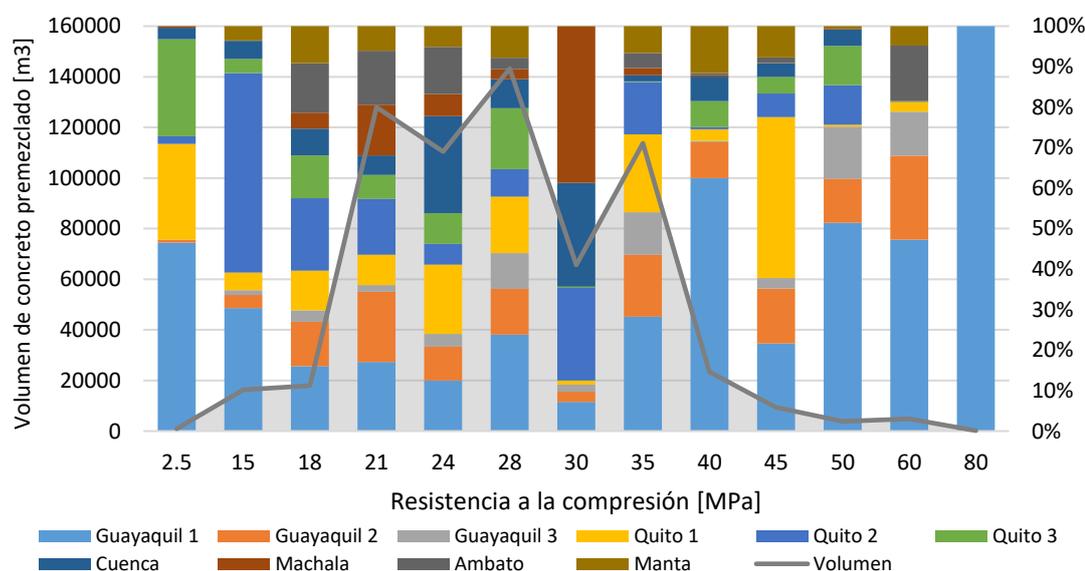


Figura 4.4 Distribución de diseños de mezcla de acuerdo a su planta de origen y volumen total de producción en el Ecuador
(Fuente: El Autor)

La [Tabla 17](#) nos muestra la distancia entre las fábricas de materias primas de diversos proveedores y las plantas de concreto premezclado que se analiza, este valor es necesario para el cálculo de inventario de transporte ($t \cdot km$), la distancia en carretera entre la planta de cemento y la planta de concreto más próxima es de 14 km y la ciudad más lejana a 450 km aproximadamente, las otras plantas varían entre 200 a 300 km. Situación similar con la planta de aditivos para concreto y la plantas de concreto, variando entre 6.7 a 461 km. El rango de la distancia entre las canteras de agregados (Grueso y fino) se encuentran entre 6.1-90 km, dicho rango es menor que el de la distancia de cemento y aditivos debido a que existen plantas locales de producción de agregados en las ciudades donde se encuentran ubicadas las plantas de concreto premezclado.

Para el flujo de Fábrica de concreto premezclado, se toma el promedio anual de producción de cada planta y se proyecta una vida útil de 50 años. El consumo de energía eléctrica es tomado de los registros contables de las plantas y el inventario de combustibles se lo obtiene del mismo sistema en unidades volumétricas (galones), este se adapta a unidad energética (MJ) que es requerida por el software, mediante el uso de una densidad promedio de combustible de 850 kg/m^3 y una capacidad calorífica de 40.8 MJ/kg para el diésel de Ecuador disponibles en los informes de Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables MERNNR et al., 2020. Existen plantas en que no se registra consumo de energía eléctrica ya que generan su propia electricidad a partir de combustibles, esto se ve reflejado en los altos consumos de diésel en proceso “Diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW”, todas las plantas cuentan con generadores de emergencia y su consumo para la unidad funcional varía entre 0.025 a 7.74 MJ/m^3 de concreto premezclado.

La [Tabla 18](#) muestra el inventario de materia y energía para el proceso de fabricación de concreto premezclado, estos valores se los obtiene a partir de ponderar los inventarios individuales de cada planta de materias primas, combustible, energía eléctrica, transporte y misceláneos utilizando la distribución del volumen de producción de los diseños de mezcla de acuerdo a su planta de origen de las diferentes resistencias fabricadas en Ecuador que se muestra en la [Figura 4.4](#). Para el cálculo de transporte, se utilizó la información de distancias disponibles en la [Tabla 17](#) y los inventarios individuales de materia prima por diseño en cada planta. Los consumos de lubricantes, acero y caucho sintético se los obtiene de un promedio anual de todas las plantas estudiadas.

Para aproximar el inventario de residuos, se considera un desperdicio del 1.15% de la masa de un concreto convencional que representa 20 kg de residuo de concreto/ m^3 de concreto premezclado y que la totalidad del caucho sintético que ingresa al sistema se vuelve residuo.

Los inventarios individuales de los diferentes diseños por planta no se los muestra por acuerdo de confidencialidad con las empresas consultadas. El resultado mostrado en la [Tabla 18](#) representa el promedio de materia prima, combustibles, instalaciones, transporte y otros para la fabricación de concreto premezclado de resistencia a la compresión entre 2.5 a 80 MPa en Ecuador.

**TABLA 17 DISTANCIAS ENTRE PLANTAS ANALIZADAS EN ESTE ESTUDIO CON FÁBRICAS DE
PROVEEDORES, INVENTARIO DE FÁBRICA DE CONCRETO PREMEZCLADO Y ENERGÍAS UTILIZADAS PARA
LA UNIDAD FUNCIONAL (1 m³)**

Flujo	Unidad	Guayaquil			Quito			Cuenca	Machala	Ambato	Manta	
		Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 1	Planta 2	Planta 3					
Distancia	Cement	km	14.5	26.2	45.6	452	428	456	271.4	225	296	200
	Gravel, crushed	km	14.1	9.49	60	33.9	38.98	6.1	73.9	59.27	30	25
	Sand, crushed	km	14.1	25.7	32	19.1	58.4	6.1	---	74.48	30	---
	Sand, from river bed	km	75	62.4	32	19.1	49.5	58.8	95	---	20	25
	Chemical, organic 1	km	11.7	6.7	39	---	---	---	---	207	---	200
	Chemical, organic 2	km	59.1	46.5	15.8	411	461	418	252	---	251	200
Concrete mixing factory	Unidad	1.5x10 ⁻⁷	2.71x10 ⁻⁷	5.99x10 ⁻⁷	2.5x10 ⁻⁷	2.67x10 ⁻⁷	4.66x10 ⁻⁷	3.1x10 ⁻⁷	3.72x10 ⁻⁷	4.84x10 ⁻⁷	5.25x10 ⁻⁷	
Energías	Electricity	kWh	7.73	6.76	0.00	3.71	2.70	0.00	3.00	3.24	2.02	6.50
	Diesel, burned in building machine	MJ	5.52	5.27	9.07	16.03	5.89	16.81	6.72	10.78	11.62	13.93
	Diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW	MJ	0.043	0.025	44.50	7.744	0.035	32.23	0	0.338	0.038	0.041

(Fuente: El Autor)

TABLA 18 INVENTARIO DE SISTEMA FABRICACIÓN DE 1 m³ DE CONCRETO PREMEZCLADO

Flujo		Resistencia a la compresión [MPa]												
		2.5	15	18	21	24	28	30	35	40	45	50	60	80
Cement, HE Type	kg	137.69	251.71	275.16	291.09	313.40	331.85	356.81	387.99	455.18	485.80	492.52	544.11	583.53
Cement, MH Type	kg	0	0	0	0.37	0.30	0.22	0	3.69	0.42	0	0	0	0
Gravel, crushed	kg	280.49	725.06	835.11	857.00	883.19	892.29	935.47	951.68	912.42	848.52	941.76	983.01	886.57
Sand, crushed	kg	228.28	150.55	186.91	265.49	149.32	207.37	363.05	154.04	230.99	122.64	163.01	194.25	295.96
Sand, from river bed	kg	1449.8	954.34	826.94	732.01	768.43	730.49	471.25	670.30	554.11	668.01	553.42	457.33	375.17
Tap water	kg	195.73	190.49	179.16	179.15	184.86	178.71	189.36	162.13	171.25	193.12	173.25	176.94	179.02
Chemical, organic 1	kg	2.92	1.05	1.56	1.49	2.40	2.29	3.15	4.30	6.51	4.50	5.84	8.92	9.14
Chemical, organic 2	kg	0.01	1.00	1.42	1.83	1.21	1.69	1.15	1.12	0.87	0.56	1.09	0.15	0.00
Concrete mixing factory	Item	2.58 x10 ⁻⁷	2.52 x10 ⁻⁷	3.34 x10 ⁻⁷	3.23 x10 ⁻⁷	3.30 x10 ⁻⁷	3.28 x10 ⁻⁷	3.16 x10 ⁻⁷	2.94 x10 ⁻⁷	2.40 x10 ⁻⁷	2.78 x10 ⁻⁷	2.71 x10 ⁻⁷	2.90 x10 ⁻⁷	1.47 x10 ⁻⁷
Electricity	kWh	4.67	4.43	3.99	4.35	3.77	4.17	3.41	4.89	6.51	4.86	5.17	5.74	7.73
Diesel, burned in building machine	MJ	10.78	6.94	9.69	9.09	10.00	10.06	8.15	8.85	7.64	11.03	7.26	7.38	5.52
Diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW	MJ	9.59	2.02	5.49	3.31	5.23	9.96	1.11	6.32	2.47	5.58	8.97	5.20	0.04
Lubricating oil	kg	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499
Steel, low-alloyed, hot rolled	kg	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238
Synthetic rubber	kg	0.0636	0.0636	0.0636	0.0636	0.0636	0.0636	0.0636	0.0636	0.0636	0.0636	0.0636	0.0636	0.0636
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3	t*km	112.35	145.60	141.80	137.97	166.36	138.07	210.10	134.99	102.33	180.38	116.16	90.21	53.81

(Fuente: El Autor)

4.3. Caracterización de indicadores de impacto ambiental del Clinker en el Ecuador

En la [Tabla 19](#) se muestra los resultados de categorías de impactos ambientales para el clinker. Este resultado se limita al clinker usado para la producción del 62.8% de cemento en Ecuador, siendo representativo para cálculos posteriores de cemento y concreto. En orden de los procesos más relevantes, se clasifica y compara las diferentes etapas de producción del clinker, la [Figura 4.5](#) nos muestra el resultado de contribución en las categorías de impacto seleccionadas.

En Climate change - GWP100, la fabricación del clinker es el proceso con mayor contribución de GWP, con 842.69 kg CO₂/ton de clinker, esto representa el 93.9% en esta categoría de impacto, esto debido a los GEI generados en los hornos de clinkerización por combustión y a la liberación de CO₂ en el proceso químico de cambio de carbonato de calcio (CaCO₃) en óxido de calcio (CaO). La producción de Pet. Coke es segundo proceso con mayor aportación a GWP, teniendo como resultado 30.21 kg CO₂/ton de clinker y una contribución del 3.37%. La producción de electricidad aporta en 1.19% al GWP, esto debido a que, en Ecuador 2018, el 82% de la electricidad proviene de hidroeléctricas (Ramirez et al., 2020). Los resultado de GWP de clinker de acuerdo a Çankaya & Pekey, 2019; Feiz et al., 2015; García-Gusano et al., 2015a van entre 850 y 929 kg CO₂/ton de clinker como lo presenta la [Figura 4.6](#), este estudio tiene un resultado de GWP de 897.04 kg CO₂/ton de clinker, muy próximo a los valores de literatura.

En Terrestrial acidification - TAP100, los óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y el amoníaco (NH₃) son las principales emisiones en contribuir a la acidificación terrestre presente en los gases de los hornos de clinkerización, con 0.964 kg SO₂-Eq/ton de clinker lo que aporta en 63.5% de TAP100, la producción de pet. coke contribuye con 0.29 kg SO₂-Eq/ton de clinker que representa un 19.25% de esta categoría de acuerdo con la [Figura 4.5](#).

TABLA 19 RESULTADO DE CATEGORÍAS DE IMPACTO DE EVALUACIÓN DE CICLO DE VIDA PARA 1 TON DE CLINKER

Categorías de Impacto	Cantidad	Unidad
Climate change - GWP100	897.04	kg CO ₂ -Eq
Terrestrial acidification - TAP100	1.52	kg SO ₂ -Eq
Freshwater eutrophication - FEP	0.42x10 ⁻⁰²	kg P-Eq
Marine eutrophication - MEP	0.08	kg N-Eq
Ozone depletion - ODPinf	4.51x10 ⁻⁰⁵	kg CFC ⁻¹¹ -Eq
Photochemical oxidant formation - POFP	2.08	kg NMVOC-Eq
Particulate matter formation - PMFP	0.65	kg PM10-Eq
Fossil depletion - FDP	86.48	kg oil-Eq

(Fuente: El Autor)

En la [Figura 4.6](#), Çankaya & Pekey, 2019 en Turquía obtienen resultados de 8.41 SO₂-Eq/ton de clinker, este estudio 1.52 kg SO₂-Eq/ton de clinker, esto debido a los bajos niveles de SO₂ producidos en la clinkerización por la composición química de la materia prima, como lo comentado en la [Sección 4.1](#).

Los resultados de Freshwater eutrophication - FEP comparando a García-Gusano et al., 2015a y este estudio, sus resultados son 1.21×10^{-02} y 0.42×10^{-02} kg P-Eq/ton de clinker respectivamente, ambos en un rango cercano. La [Figura 4.5](#) muestra que el proceso de mayor contribución es la fabricación de pet. coke con un 43.04% del total de FEP. En Marine eutrophication - MEP el resultado obtenido para Ecuador es de 0.08 kg N-Eq/ton de clinker, el proceso de producción de clinker contribuye con un 78.6% de MEP, esto debido a emisiones de NO_x presentes en la clinkerización.

Se analiza Ozone depletion - ODPinf, el resultado obtenido es 4.51×10^{-05} kg CFC⁻¹¹-Eq/ton de clinker, de acuerdo con la [Figura 4.5](#), el proceso dominante es la producción de pet. coke, este resultado es comparable con el valor obtenido por Çankaya & Pekey, 2019 de 0.252 kg CFC⁻¹¹-Eq/ton de clinker. Otro proceso en el que el pet. coke es dominante es Fossil depletion - FDP, esto debido a que esta categoría expresa el agotamiento de recursos fósiles, con un resultado de 86.48 kg oil-Eq/ton de clinker.

En Photochemical oxidant formation - POFP, el proceso de mayor contribución es la clinkerización con un 77.8%, esto por los niveles de VOC presentes en los gases emitidos por los hornos como se lo analiza en la [Sección 4.1](#). En la [Figura 4.6](#), García-Gusano et al., 2015a, obtiene como resultado 1.24 kg NMVOC-Eq/ton de clinker, un valor cercano al resultado de este estudio, 2.08 kg NMVOC-Eq/ton de clinker. El resultado de Particulate matter formation - PMFP se debe a los aerosoles primarios como el PM, y los aerosoles secundarios como SO₂, NH₃ y NO_x, presentes en la clinkerización, con un resultado de 0.65 kg PM10-Eq/ton de clinker.

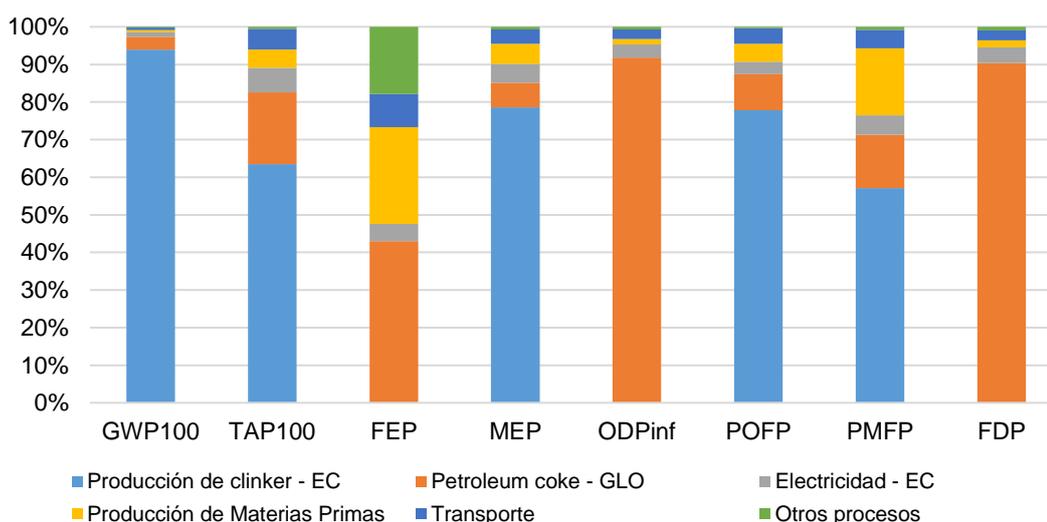


Figura 4.5 Análisis de contribución de indicadores de impacto ambiental por proceso de Clinker en el Ecuador
(Fuente: El Autor)

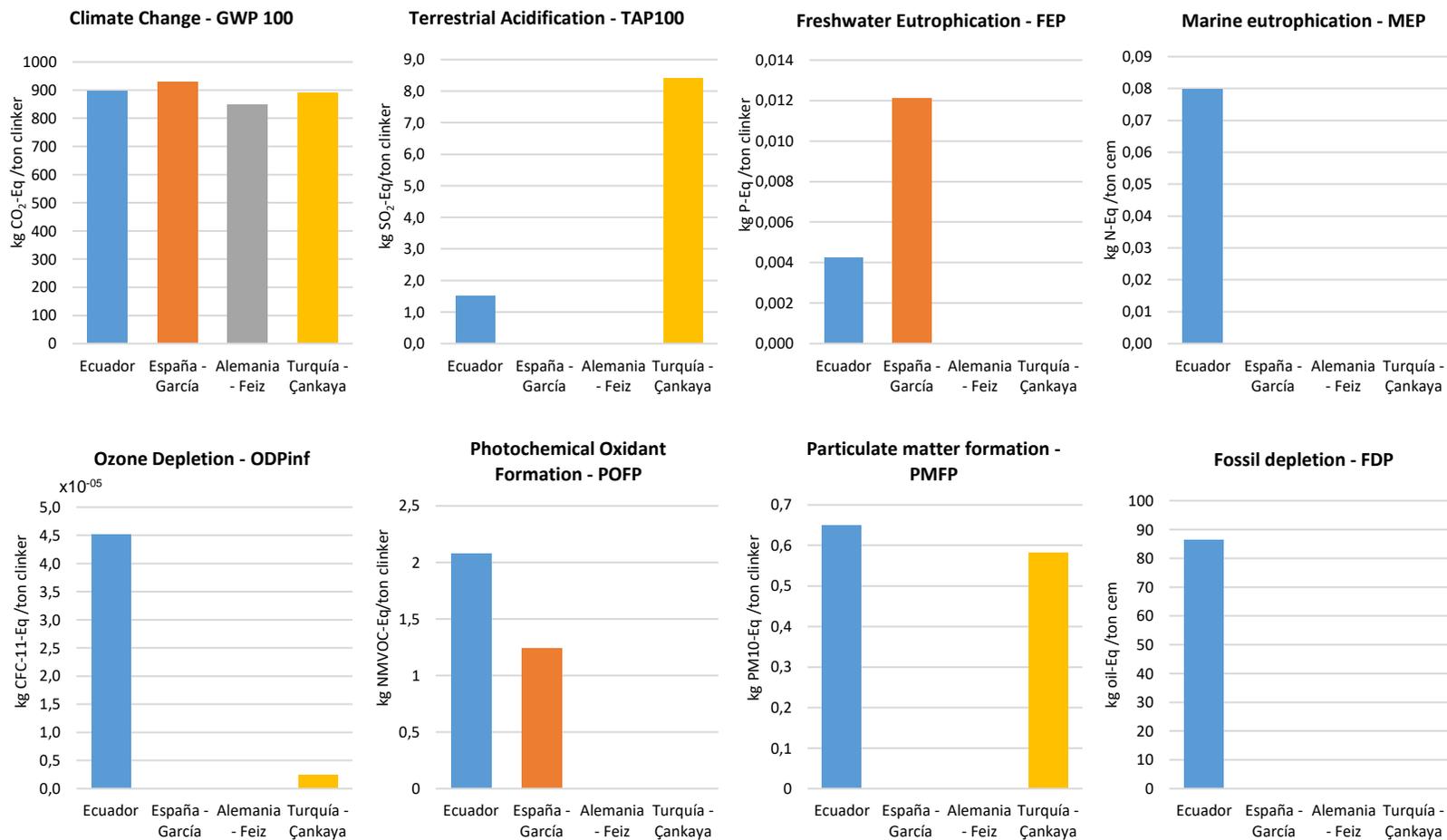


Figura 4.6 Comparación de resultados de indicador de impacto ambiental de clinker otros resultados
(Fuente: El Autor)

4.4. Caracterización de indicadores de impacto ambiental del Cemento en Ecuador

De acuerdo con FICEM, 2020, la producción de cemento en el Ecuador para el año 2019 es de 6.030 miles de toneladas métricas, se estima que es el país en Latinoamérica continental con mayor consumo de cemento per cápita con 355 kg/hab, seguido de México con 343 kg/hab y Perú con 333 kg/hab, orientar la industria de la construcción en Ecuador a la sostenibilidad es un reto importante a incluir en las agendas nacionales y determinar el desempeño ambiental de la materia prima de este sector es el primer paso.

En la literatura, Çankaya & Pekey, 2019; C. Chen et al., 2010; Feiz et al., 2015; García-Gusano et al., 2015a; C. Li et al., 2015; Stafford et al., 2016; Valderrama et al., 2012; Vázquez-Rowe et al., 2019 exponen que el rango de GWP para cemento Portland ordinario van entre 632 a 950 kg CO₂-Eq/ton de cemento mientras que los cementos con adiciones minerales varían entre 452 a 850 kg CO₂-Eq/ton de cemento (Bushy & Meil, 2014; Çankaya & Pekey, 2019; Feiz et al., 2015; Vázquez-Rowe et al., 2019) como se muestra en la [Tabla 7](#). En este estudio, se determinó el desempeño ambiental de los tres cementos más vendidos en Ecuador, el cemento Tipo GU (uso general) es el de mayor consumo. El cemento en Ecuador se encuentra entre 465.89 a 696.81 kg CO₂-Eq/ton de cemento, siendo el valor de Tipo GU 545.78 kg CO₂-Eq/ton de cemento de acuerdo con la [Tabla 20](#). Los resultados obtenidos son comparables con la literatura revisada y se encuentran en esos rangos, los valores de Ecuador se encuentran en el límite inferior debido a los niveles de adiciones minerales en el cemento y la eficiencia de la planta de 3.01 GJ/ton de cemento en consumo de energía térmica en comparación a la literatura de 2.81 a 5.4 GJ/ton de cemento (Josa et al., 2007; C. Li et al., 2015; Tun et al., 2020).

TABLA 20 RESULTADO DE CATEGORÍAS DE IMPACTO DE EVALUACIÓN DE CICLO DE VIDA PARA 1 TON DE CEMENTO HIDRÁULICO COMPUESTO

Categorías de Impacto	GU	HE	MH	Unidad
Climate change - GWP100	545.78	696.81	465.89	kg CO ₂ -Eq
Terrestrial acidification - TAP100	1.03	1.27	0.88	kg SO ₂ -Eq
Freshwater eutrophication - FEP	3.59x10 ⁻⁰³	4.23x10 ⁻⁰³	3.22x10 ⁻⁰³	kg P-Eq
Marine eutrophication - MEP	0.054	0.067	0.047	kg N-Eq
Ozone depletion - ODPinf	2.83x10 ⁻⁰⁵	3.59x10 ⁻⁰⁵	2.43x10 ⁻⁰⁵	kg CFC-11-Eq
Photochemical oxidant formation - POFP	1.34	1.68	1.16	kg NMVOC-Eq
Particulate matter formation - PMFP	0.48	0.56	0.42	kg PM10-Eq
Fossil depletion - FDP	54.85	69.30	47.14	kg oil-Eq

(Fuente: El Autor)

El proceso de producción de clinker aporta un 98% de GWP total de los cementos hidráulicos compuestos en Ecuador de acuerdo con la [Figura 4.7](#), esto debido a los GEI emitidos en el proceso de clinkerización, seguido del proceso de generación de electricidad con un rango entre 0.9 a 1.4%.

Analizando Terrestrial acidification - TAP100, los cementos de Ecuador tienen un rango entre 0.88 a 1.27 kg SO₂-Eq/ton de cemento, estos valores son muy cercanos a los reportados en la literatura de estudios similares, entre 1.467 a 4.1 kg SO₂-Eq/ton de cemento (Bushi & Meil, 2014; García-Gusano et al., 2015a; C. Li et al., 2015; Nakic, 2018; Stafford et al., 2016; Tun et al., 2020), mientras que Çankaya & Pekey, 2019 para cementos puzolánicos reporta entre 0.87 a 1.16 kg SO₂-Eq/ton de cemento, dado a que ambos son cementos con adiciones y con materiales similares usados en su composición, sus resultados se acercan más. Con respecto a los flujos que componen el inventario de ciclo de vida, el NO_x es el mayor contribuyente a este proceso seguido del SO₂, ambos del proceso de clinkerización.

García-Gusano et al., 2015a en su estudio de ACV para la industria de cemento española, calcula en Freshwater eutrophication - FEP un valor de 1.23x10⁻⁰² kg P-Eq/ton de cemento, este estudio (Ecuador) determina valores entre 3.22x10⁻⁰³ a 4.23x10⁻⁰³ kg P-Eq/ton de cemento, siendo el proceso de mayor contribución la fabricación de clinker, comparando ambos estudios se encuentran en rangos similares, en Marine eutrophication - MEP, los resultados obtenidos son 0.047 a 0.067 kg N-Eq/ton de cemento, debido a las emisiones de NO_x en la fabricación de clinker.

Los resultados de Ozone depletion - ODPinf para cementos en Ecuador se encuentran entre 2.43x10⁻⁰⁵ a 3.59x10⁻⁰⁵ kg CFC⁻¹¹-Eq/ton de cemento, esto concuerda con los valores mostrados en la [Tabla 7](#) que varían entre 9.60x10⁻⁰⁹ a 4.20x10⁻⁰⁵ kg CFC⁻¹¹-Eq/ton de cemento (Bushi & Meil, 2014; Çankaya & Pekey, 2019; C. Chen et al., 2010; W. Chen et al., 2015; García-Gusano et al., 2015b), el proceso de mayor contribución es la producción de clinker debido al uso de pet. coke como combustible, esto también ocurre en Fossil depletion – FDP, ya que esta categoría representa el agotamiento de los recursos fósiles.

Valores de Photochemical oxidant formation - POFP en este estudio van entre 1.16 a 1.68 kg NMVOC-Eq/ton de cemento, esto debido a la emisiones de VOC, NO_x y SO₂ en la fabricación de clinker, el resultado de POFP es similar al obtenido por García-Gusano et al., 2015a de 1.09 kg NMVOC-Eq/ton de cemento. Resultados de Particulate matter formation - PMFP para los cementos en Ecuador se encuentran en el rango de 0.42 a 0.56 kg PM10-Eq/ton de cemento, siendo el flujo de mayor contribución el NO_x seguido de PM, esto debido a los controles y la eficiencia de los equipos para mitigar el material particulado.

El proceso crítico en la elaboración de cemento en el Ecuador es la fabricación de clinker, este proceso tiene una mayor contribución en las categorías de impacto analizadas, como se muestra en la [Figura 4.7](#). Analizando el inventario de ciclo de vida, en GWP el flujo de mayor impacto es el CO₂ y en las demás categorías de impacto es el NO_x, dado los niveles bajos de SO₂ y PM en la producción de clinker en el Ecuador según lo analizado en la [Sección 4.1](#).

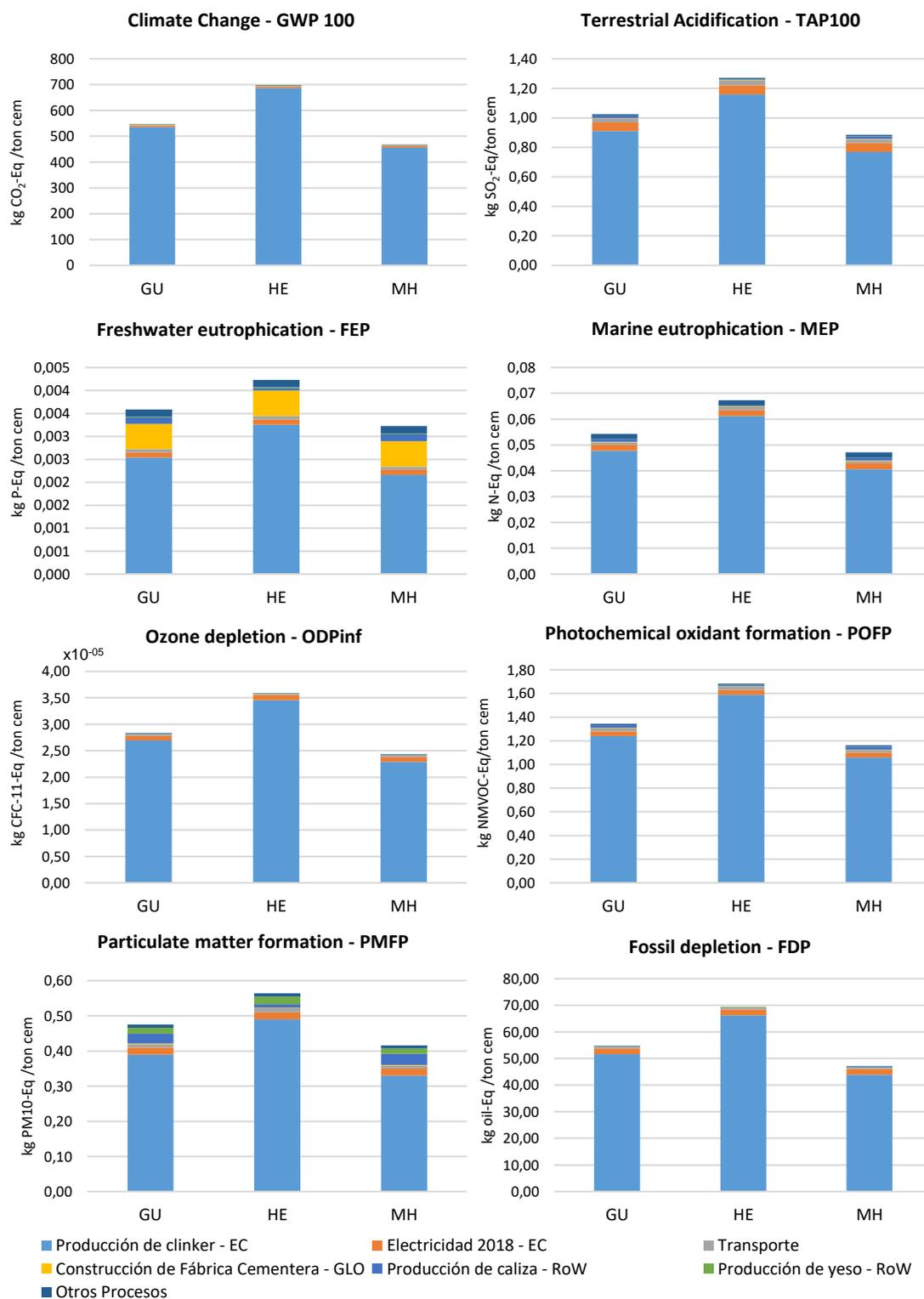


Figura 4.7 Análisis de contribución por proceso del cemento en el Ecuador
(Fuente: El Autor)

4.5. Caracterización de indicadores de impacto ambiental del Concreto en Ecuador

El resultado de ACV de las categorías de impacto seleccionadas para la unidad funcional de 1 m³ de concreto premezclado con resistencias entre 2.5 a 80 MPa para la producción en Ecuador se lo presenta en la [Tabla 21](#). Para el cálculo de este estudio se utilizó los resultados de inventario de la [Tabla 18](#), estos valores representan el promedio de concreto premezclado del Ecuador, en base a la distribución porcentual de producción de concreto por planta presentados en la [Figura 4.4](#).

El resultado muestra que Climate change - GWP100, los concretos de baja resistencia (18MPa<) tienen tres cuartos de GWP de los concretos de alta resistencia (>40 MPa), esto debido a que existe la misma relación entre los contenidos de cemento de ambas categorías. La [Figura 4.8](#) muestra el análisis de contribución de las categorías de impacto seleccionadas por proceso, se identifica que la producción de cemento es el proceso crítico para esta categoría de impacto, con una influencia entre el 84 al 88% en concretos convencionales (entre 18 a 40 MPa), en concretos de baja resistencia la influencia del cemento decrece a 75.96% y la producción de agregados toma un rol importante ya que en reemplazo de cemento se utiliza agregado fino, en concretos de alta resistencia (>40MPa) aumenta el consumo de cemento para alcanzar mayores resistencias produce que exista un crecimiento considerable en GWP y la contribución del cemento es entre 89% al 92%. El transporte es el segundo proceso con mayor contribución en esta categoría, con valores entre 1.13 a 8.30%, los concretos de alta resistencia muestran valores bajos de contribución en transporte entre 1.13 a 2.83%, porque los concretos de resistencias mayores a 50 MPa son despachados mayoritariamente por las plantas de la ciudad de Guayaquil, teniendo la menor distancia a la planta de cemento como lo muestra la [Tabla 17](#). Los siguientes dos procesos con una contribución significativa son la producción de agregados y la producción de aditivos, con resultados entre 1.9 a 7.89%, porque el consumo de agregados por m³ de concreto es 67 a 84% de la totalidad de la masa con un bajo contenido de CO₂ por kg de agregados mientras que los aditivos por m³ de concreto es 0.01 a 0.02% con un alto contenido de CO₂ por kg de aditivo. Otros procesos como consumo de energía eléctrica, consumo de combustible y agua representan entre el 0.5 al 2% de la totalidad de GWP.

Los resultados de Terrestrial acidification - TAP100 varían entre 0.35 a 0.91 kg SO₂-Eq/m³ de concreto premezclado, la producción de cemento es el proceso crítico, con contribuciones entre 49.79 a 81.83%, crece a medida que el contenido de cemento aumenta, necesario para producir concretos de mayor resistencia, el valor de TAP100 por m³ de concreto premezclado se mantiene relativamente constante en las diferentes resistencias, con valores entre 0.16 a 0.22 kg SO₂-Eq/m³ de concreto premezclado. Plantas con una distancia superior con la fábrica de cemento aumentan en TAP100 por transporte, esto se observa en concretos más utilizados del país (21 a 30 MPa). Los valores de este estudio para resistencias entre 21 a 50 MPa son 0.55 a 0.83 kg SO₂-Eq/m³ de concreto premezclado, menor que estudios de Colombia, Perú, Sudáfrica, Brasil y Canadá para las mismas resistencias el valor de TAP100 varía entre 0.622 a 1.73 kg SO₂-Eq/m³ de concreto premezclado como se muestra en

la [Tabla 9](#) (Gmünder et al., 2017; Muigai et al., 2013; F. B. Silva et al., 2019; Werner & Richter, 2007) debido a la baja emisión de SO₂ en el clinker.

Para la categoría de impacto Freshwater eutrophication - FEP, los valores reportados por este estudio son 5.79×10^{-03} a 13.3×10^{-03} kg P-Eq/m³ de concreto premezclado, el proceso de mayor contribución con valores entre 34 a 49% es la producción de agregados, de los cuales la producción de agregado triturado tiene mayor contribución que la producción de arena natural, el segundo proceso con mayor contribución es producción de aditivos, con valores entre 10.96 a 32.10%, esto por la emisión de fósforo en los procesos de extracción en canteras y producción de aditivos. El proceso crítico en esta categoría de impacto es "gravel production, crushed | gravel, crushed | APOS, U - RoW".

Los resultados de Marine eutrophication - MEP van entre 0.019 a 0.048 kg N-Eq/m³ de concreto premezclado, el proceso crítico es la producción de cemento esto por las emisiones de NO_x en la producción de clinker. El valor de otros procesos es relativamente constante en las diferentes resistencias con valores entre 0.009 a 0.011 kg N-Eq/m³ de concreto premezclado. Gursel & Ostertag, 2017 en su estudio realizado a kg N-Eq/m³ de concreto premezclado para concreto premezclado con OPC reportan valores entre 0.18 a 0.395 kg N-Eq/m³ de concreto premezclado, el resultado es elevado debido al transporte de agregados hasta Singapur desde otros países, adaptando este estudio sin el transporte de agregados los valores varían entre 0.1 a 0.19 kg N-Eq/m³ de concreto premezclado, un rango próximo a los que se obtienen en este estudio.

En la categoría de impacto de Ozone depletion - ODPinf, los resultados de este estudio son 0.93×10^{-05} a 2.46×10^{-05} kg CFC-11-Eq/m³ de concreto premezclado siendo la producción de cemento el proceso de mayor contribución con 53.18 a 85.10% de la totalidad de la categoría analizada, el proceso de transporte es el siguiente en contribución con valores entre 3.72 a 20%, este resultado es sensible, presentando mayor contribución en las plantas más lejanas a la fábrica de cemento. De acuerdo con la literatura consultada, estudios de Colombia, Perú, Sudáfrica, Brasil y Canadá para resistencias entre 21 a 50 MPa, el resultado de ODPinf es 6.93×10^{-05} a 2.04×10^{-05} kg CFC-11-Eq/m³ de concreto premezclado, el rango de la literatura es similar a lo obtenido en este estudio para las resistencias entre 21 a 50 MPa que es 1.50×10^{-05} a 2.23×10^{-05} kg CFC-11-Eq/m³ de concreto premezclado.

Los NO_x y VOC son las principales sustancias en contribuir en la categoría de impacto Photochemical oxidant formation - POFP, se encuentran presentes mayoritariamente en la producción de clinker como se lo analiza en la [Sección 4.3](#), por lo que la producción de cemento es el proceso crítico en esta categoría, con una contribución del 46.73 al 82.43%. Los valores de POFP para este estudio se encuentran en 0.50 a 1.19 kg NMVOC-Eq/m³ de concreto premezclado, el resultado de todos los procesos exceptuando la producción de cemento se mantienen entre 0.20 a 0.30 kg NMVOC-Eq/m³ de concreto premezclado. Adaptando el estudio de Gursel & Ostertag, 2017, el resultado sin considerar el transporte de agregados es 2.8 a 4 kg NMVOC-Eq/m³ de concreto premezclado elaborado con cemento OPC, con un rango superior al de este estudio.

TABLA 21 RESULTADO DE CATEGORÍAS DE IMPACTO DE EVALUACIÓN DE CICLO DE VIDA PARA 1 m³ DE CONCRETO PREMEZCLADO CON DIFERENTE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Resistencia a la Compresión	Climate change - GWP100 kg CO₂-Eq	Terrestrial acidification - TAP100 kg SO₂-Eq	Freshwater eutrophication - FEP kg P-Eq	Marine eutrophication - MEP kg N-Eq	Ozone depletion - ODPinf kg CFC-11-Eq	Photochemical oxidant formation - POFP kg NMVOC-Eq	Particulate matter formation - PMFP kg PM10-Eq	Fossil depletion - FDP kg oil-Eq
2.5 MPa	126.02	0.35	5.79x10 ⁻⁰³	0.019	0.93x10 ⁻⁰⁵	0.50	0.17	22.55
15 MPa	206.80	0.49	8.04x10 ⁻⁰³	0.027	1.35x10 ⁻⁰⁵	0.67	0.23	30.17
18 MPa	225.84	0.54	9.40x10 ⁻⁰³	0.029	1.45x10 ⁻⁰⁵	0.72	0.25	33.43
21 MPa	237.22	0.55	9.73x10 ⁻⁰³	0.030	1.50x10 ⁻⁰⁵	0.75	0.26	34.85
24 MPa	256.08	0.60	10.2x10 ⁻⁰³	0.033	1.63x10 ⁻⁰⁵	0.81	0.28	37.89
28 MPa	267.54	0.62	10.3x10 ⁻⁰³	0.034	1.66x10 ⁻⁰⁵	0.83	0.29	38.91
30 MPa	290.85	0.67	11.4x10 ⁻⁰³	0.036	1.85x10 ⁻⁰⁵	0.90	0.32	43.17
35 MPa	310.31	0.69	11.2x10 ⁻⁰³	0.038	1.88x10 ⁻⁰⁵	0.93	0.32	44.87
40 MPa	355.38	0.77	11.8x10 ⁻⁰³	0.041	2.07x10 ⁻⁰⁵	1.02	0.35	50.86
45 MPa	379.38	0.83	11.2x10 ⁻⁰³	0.045	2.29x10 ⁻⁰⁵	1.12	0.39	52.25
50 MPa	382.03	0.82	12.0x10 ⁻⁰³	0.044	2.23x10 ⁻⁰⁵	1.10	0.38	53.37
60 MPa	419.55	0.89	13.3x10 ⁻⁰³	0.048	2.40x10 ⁻⁰⁵	1.17	0.41	59.18
80 MPa	442.14	0.91	12.3x10 ⁻⁰³	0.048	2.46x10 ⁻⁰⁵	1.19	0.41	60.25

(Fuente: El Autor)

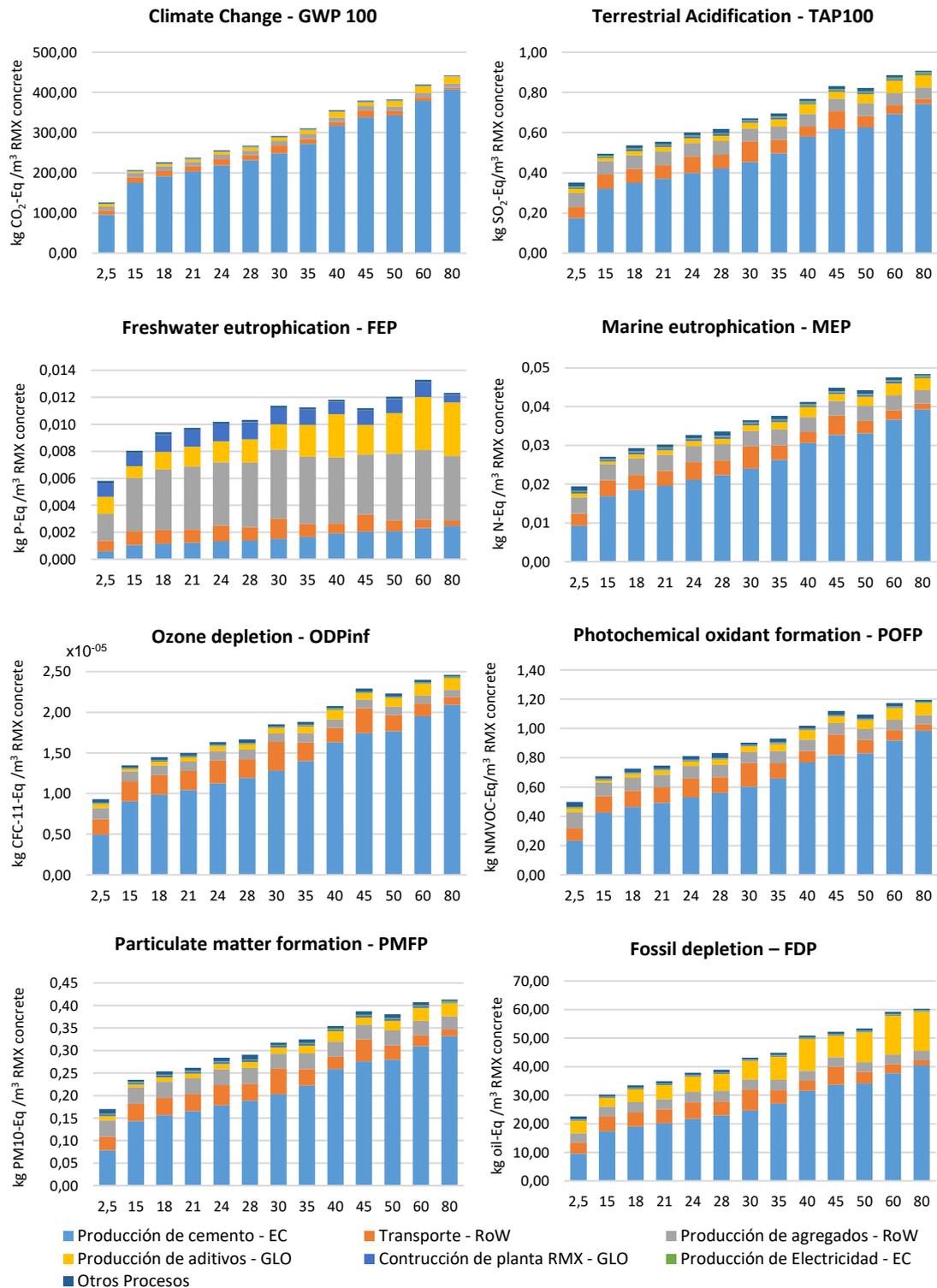


Figura 4.8 Análisis de contribución por proceso del concreto RMX en el Ecuador
(Fuente: El Autor)

La [Tabla 21](#) muestra el resultado de Particulate matter formation – PMFP, con un rango entre 0.17 a 0.41 kg PM10-Eq/m³ de concreto premezclado, se adapta el estudio de Gursel & Ostertag, 2017 para el análisis de concreto en Singapur quitando el proceso de transporte de agregados se obtiene valores entre 1.70 a 2.25 kg PM10-Eq/m³ de concreto premezclado, esta diferencia se debe a la utilización de OPC para la elaboración de concreto en Singapur. El proceso crítico de la categoría de impacto descrita es la producción de cemento, con contribuciones entre 46.10 a 80.23% como se muestra en la [Figura 4.8](#), esta contribución es creciente por el uso de cemento para aumentar la resistencia a la compresión del concreto. El transporte causa sensibilidad en esta categoría, los diseños de concretos convencionales (entre 18 a 30 MPa) despachados en las plantas más lejanas a la fábrica de cemento muestran valores superiores de PM10 que los concretos de alta resistencia despachados en las plantas más cercanas a la fábrica de cemento. Otros procesos diferentes a la producción de cemento presentan valores similares de PM con rangos entre 0.08 a 0.11 kg PM10-Eq/m³ de concreto premezclado.

Se analiza Fossil depletion - FDP, el resultado va de 22.55 a 60.25 kg oil-Eq/m³ de concreto premezclado, los procesos de producción de cemento y producción de aditivos son los procesos críticos, debido al consumo de energía térmica para la producción de clinker y químicos orgánicos, la contribución de cemento es 42.28 a 67.09% y la de aditivos es de 10.17 a 23.02%, ambas crecientes por el consumo progresivo de estos materiales para aumentar la resistencia de los concretos.

La [Figura 4.9](#) muestra una comparación en Climate change - GWP100 de resultados en este estudio con los valores de estudios disponibles en la literatura, el rango de resistencia a compresión de la literatura es 20 a 70 MPa, los estudios de Colombia, Perú, Sudáfrica, Canadá, Brasil y Eslovenia son de concretos convencionales y de alta resistencia, entre 20 a 50 MPa (Gmünder et al., 2017; Muigai et al., 2013; F. B. Silva et al., 2019; Turk et al., 2015; Werner & Richter, 2007). El estudio de Hossain et al., 2020 de concretos en China analiza resistencias entre 59 a 70 MPa. El resultado de este estudio para concreto en Ecuador de 21 MPa es 237.22 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado, estudios con resistencia similar (20 MPa) son Perú, Colombia, Canadá y Sudáfrica, valores más próximos son Perú y Colombia, específicamente concretos de cemento puzolánico con un diferencial entre 0.60 a 6.19%, concretos de cemento con caliza de Perú utilizan materias primas similares a Ecuador, poseen +55.68 a +66.20 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado y concretos elaborados con OPC una diferencia entre +79.01 a +145.60 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado, debido a los altos contenidos de clinker de estos cementos.

Resistencias entre 25 a 35 MPa se analizan en los estudios de Muigai et al., 2013; Turk et al., 2015; Werner & Richter, 2007 en Sudáfrica, Eslovenia y Canadá, el resultado en Ecuador es 256.08 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado para 24 MPa, resistencia a la compresión de 25 MPa en la literatura antes mencionada muestra valores entre 221.85 a 240 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado, este estudio reporta un valor superior en 5.90 a 13.37%. Los mismos autores estudian concretos de 40 MPa, muestran resultados entre 246.5 a 392.74 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado, Ecuador en este estudio determina un valor de 355.37 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado, mismo que se encuentran en este rango.

Resistencia a la compresión de 30 MPa este estudio reporta un valor de 290.85 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado, los resultados de Canadá y Sudáfrica con diferencias de 6.44 a 9.91%. Ecuador reporta para 35 MPa un resultado de 310.30 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado, Canadá y Sudáfrica valores entre 297.56 a 320.97 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado, Ecuador se encuentra en este rango. Eslovenia presenta valores por debajo del promedio del resto de países debido al uso de escorias de acero y arenas de fundición, con reducciones del 22.64 y 19.43% con respecto a los concretos de 30 y 35 MPa de este estudio. Los concretos de 45 y 50 MPa son analizados por los mismos autores, siendo Sudáfrica el resultado más próximo al concreto de 45 MPa de este estudio, con una diferencia de +11.71 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado y para 50 MPa, estudios de Sudáfrica y Canadá muestran para concretos de 50 MPa, un rango de 443.05 a 351.65 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado, Ecuador reporta un valor de 382.03 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado que se encuentra dentro de este rango.

Hossain et al., 2020 analiza la producción de concreto de alta resistencia en China con resistencia a la compresión entre 59 a 70 MPa, los concretos entre 59 a 64 MPa son comparables con el concreto de 60 MPa de este estudio, con valores entre 390 a 511 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado, en Ecuador se calcula un resultado de 419.54 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado, próximo al resultado de concreto con slag de 63 MPa con +26.45 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado. Los resultados de 68 y 70 MPa de Hossain et al., 2020 son los más próximos al valor de 80 MPa de este estudio, con +36.86 y -10.13 kg CO₂-Eq/m³ de concreto premezclado respectivamente.

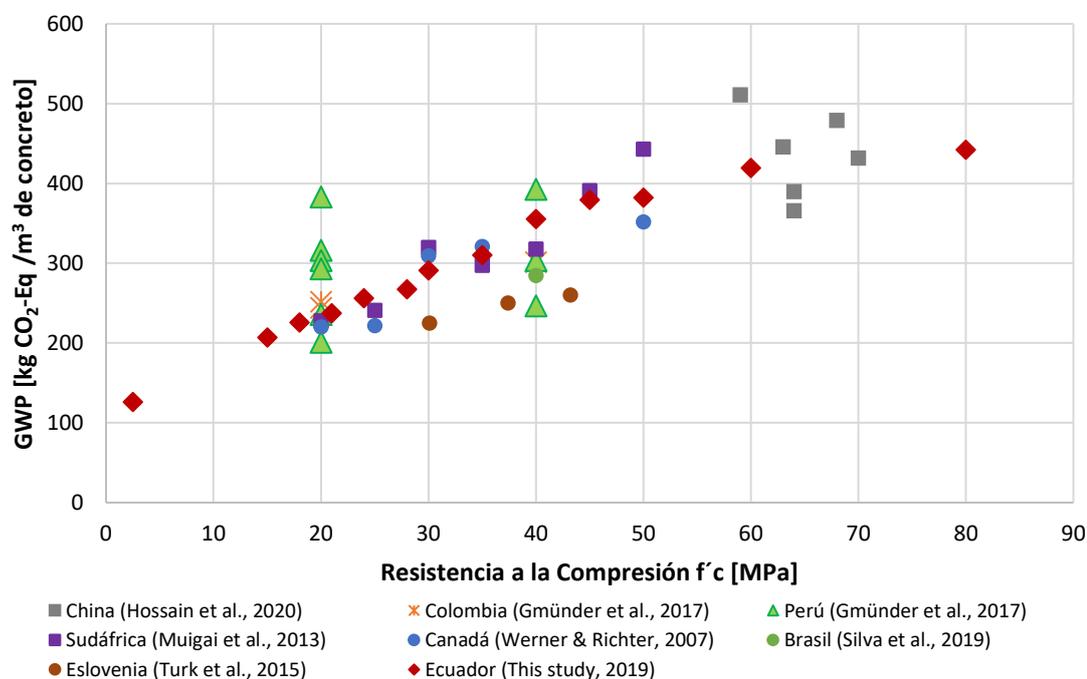


Figura 4.9 Comparación de GWP de los resultados de este estudio con la literatura investigada.
(Fuente: El Autor)

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. El desempeño ambiental de la producción de clinker, cemento y concreto en el Ecuador se ha analizado cuantitativamente usando ACV. Se ha generado inventarios de entradas y salidas de materia y energía confiables del 62.8% de la industria del cemento y del 55% de la industria del concreto en el Ecuador, los mismos que han sido verificados in situ. Conociendo la importancia del inventario de gases de combustión en la sensibilidad de los resultados de impacto ambiental, fueron verificados con metodologías de factor de emisión, resultando los valores del inventario cercano a los calculados.
2. La metodología de ACV utilizó bases de datos confiables para modelar los procesos necesarios para el cálculo, utilizando Ecoinvent 3.7.1 con bases de datos mundiales y de países cercanos con producciones similares al país de estudio y datos de energía calculados específicamente para electricidad de Ecuador en el año 2018 disponibles en la literatura.
3. Se establece indicadores de impacto de ciclo de vida para la producción de clinker, cemento y concreto acorde a la naturaleza de producción, su inventario de entradas y salidas, en especial en las emisiones de gases, consumo de combustibles y generación de residuos.
4. Los impactos ambientales de la producción del clinker se deben en su mayoría los gases generados en la combustión necesaria para la transformación de carbonato de calcio en óxido de calcio, este proceso se vuelve crítico en toda la cadena de valor del sector de la construcción, tanto en la producción de cemento y concreto, en la mayor parte de categorías de impacto establecidas. En comparación con la literatura investigada, el resultado de desempeño ambiental del clinker se encuentran en el rango de los valores de la literatura.
5. Se determina el impacto ambiental de la industria del cemento en el Ecuador, utilizando datos de inventarios de los cementos más utilizados en la construcción convencional y de gran magnitud, elaborados bajo la normativa INEN 2380 siendo estos el Tipo GU, HE y MH. El proceso crítico es la producción de clinker, se comparó los resultados de cemento en el Ecuador con la literatura revisada y se encuentran en el límite inferior del rango de estudios consultados, debido a los niveles de adiciones minerales en el cemento ecuatoriano y la eficiencia de las plantas de este estudio.
6. Se ha abarcado un extenso rango de resistencia a la compresión en la cuantificación del desempeño ambiental del concreto premezclado, desde 2.5 MPa hasta 80 MPa, se ha incluido a detalle cada concreto convencional usado por la industria de la construcción (18, 21, 24, 28, 30, 35 y 40 MPa), de esta manera estos resultados pueden ser utilizados para calcular y mejorar de ser posible, los impactos ambientales de cualquier tipo de construcción, desde viviendas, edificaciones y proyectos de gran infraestructura en el Ecuador utilizando ACV. Se evidencia que la producción de cemento es el proceso crítico de la producción de concreto premezclado.

5.2. Recomendaciones

1. Se insta a que los resultados de este estudio puedan ser utilizados por la comunidad científica como línea base para mejorar el desempeño ambiental de las edificaciones y a los tomadores de decisiones gubernamentales en la elaboración de normativas y regulaciones ambientales en la industria de la construcción en el Ecuador.
2. Valores del desempeño ambiental del cemento junto con los valores de inventario de producción de concreto sirven para poder determinar el impacto ambiental de cualquier diseño de concreto premezclado en Ecuador a partir de su dosificación. Se recomienda ampliar un futuro estudio con resultados de desempeño ambiental de las principales ciudades del Ecuador.
3. La disponibilidad de bases de datos locales de desempeño ambiental es necesaria para mejorar el acceso al cálculo ambiental cuantitativo mediante la utilización de ACV, por lo que se recomienda la publicación de este estudio en formatos compatibles para softwares de ACV. Es necesario el aumento de bases de datos locales para otros materiales de la construcción como el acero de refuerzo, mampostería como bloques de concreto o ladrillos, mejorando la calidad de resultados en estudios de desempeño ambiental de edificaciones.
4. Simplificar el cálculo del impacto ambiental de edificaciones, proyectos inmobiliarios y proyectos de infraestructura es recomendable, una manera de conseguir esto es realizar bases de datos con el desempeño ambiental con enfoque de ciclo de vida de elementos constructivos como vigas, columnas, losas, cimentaciones y viviendas con diseños estructurales y arquitectónicos más utilizados y habituales en el Ecuador.
5. Pese a tener baja contribución de impacto ambiental en los procesos analizados en este estudio, el cálculo del desempeño ambiental del proceso de producción de agregados, arena natural y producción de combustibles locales principalmente sería una oportunidad de mejora en la calidad de los valores obtenidos en los productos analizados por este estudio.
6. Se identifica que uno de los pasos para la optimización de la línea base en GWP del clinker es la mejora de la eficiencia de los procesos energéticos, se recomienda la reducción de consumo de combustibles fósiles convencionales por otros alternativos como biomasa o residuos. Es importante mantener los controles de gases de combustión en los hornos de clinker, con las medidas y equipos necesarios, además asegurar la calidad de la materia prima, antes, durante y después de la producción de clinker, lo que permite una optimización considerable de los recursos de mezclas finales de los productos, por ende, su impacto ambiental.
7. En el cemento, las oportunidades de mejora del desempeño ambiental es la adición de materiales cementicios suplementarios para reducir la cantidad de clinker utilizada, es necesario determinar la factibilidad técnica, económica y ambiental de esta alternativa para no incurrir en elevados costos ni aumento de impacto ambiental por nuevos procesos (ejemplo: transporte).
8. Se recomienda la optimización de mezclas de concreto, obteniendo la resistencia a la compresión requerida con la menor cantidad de cemento posible, reduciendo el impacto ambiental del proceso crítico de este estudio, posterior se puede analizar el reemplazo de cemento por materiales

cementicios suplementarios y mejorar la eficiencia energética de la planta. El transporte de materias primas es un proceso que aumenta la sensibilidad de los resultados de las categorías de impacto, por lo que se recomienda utilizar materias primas cercanas a las plantas de concreto premezclado, la calidad de las materias primas no debe comprometer el desempeño físico del concreto ya que esto provoca el aumento del consumo de cemento para alcanzar la resistencia requerida aumentando y posiblemente superando la línea base.

BIBLIOGRAFÍA

- Acebo, M., Vera, J., Rodríguez, J., & Zambrano, J. (2016). *Estudios Industriales, orientación estratégica para la toma de decisiones : Industria de la Construcción*. <http://www.espae.espol.edu.ec/publicaciones-de-espae/>
- AENOR. (2011). UNE-EN 197-1. Cemento Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. *Asociación Española de Normalización y Certificación*.
- Ameri, F., Zareei, S. A., & Behforouz, B. (2020). Zero-cement vs. cementitious mortars: An experimental comparative study on engineering and environmental properties. *Journal of Building Engineering*, 32, 101620. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101620>
- Anderson, R., Dewar, J. D., McKee, H., & Treasaden, I. (1992). Manual of Ready-Mixed Concrete. In *Manual of Ready-Mixed Concrete*. <https://doi.org/10.4324/9780203487754>
- ASTM. (2018). ASTM C33 / C33M - 18 Standard Specification for Concrete Aggregates. In *Annual Book of ASTM Standards: Vol. 04.02*. <https://www.astm.org/Standards/C33.htm>
- ASTM. (2019). ASTM C494 / C494M - 19 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. In *Annual Book of ASTM Standards: Vol. 04.02*. <https://www.astm.org/Standards/C494.htm>
- ASTM. (2020a). ASTM C1157 / C1157M - 20 Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. In *Annual Book of ASTM Standards: Vol. 04.01*. <https://www.astm.org/Standards/C1157.htm>
- ASTM. (2020b). ASTM C150 / C150M - 20 Standard Specification for Portland Cement. In *Annual Book of ASTM Standards: Vol. 04.01*. <https://www.astm.org/Standards/C150.htm>
- ASTM. (2020c). ASTM C39 / C39M - 20 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In *Annual Book of ASTM Standards: Vol. 04.02*. American Society for Testing and Materials. <https://www.astm.org/Standards/C39.htm>
- ASTM. (2020d). ASTM C595 / C595M - 20 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. In *Annual Book of ASTM Standards: Vol. 04.01*. ASTM International. <https://www.astm.org/Standards/C595.htm>
- Banco Central del Ecuador. (2019). *Reporte Trimestral del Mercado Laboral (Diciembre 2019)*. <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/SectorReal/Previsiones/In dCoyuntura/Empleo/imle201912.pdf>
- Banco Central del Ecuador. (2020a). *Cuentas Nacionales Trimestrales del Ecuador (2019.IV)*. <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Catalogo/Cuentas>

Nacionales/cnt64/CTASTRIM109.xlsx

Banco Central del Ecuador. (2020b). *Cuentas Nacionales Trimestrales del Ecuador (2020.II)*.

<https://contenido.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Catalogo/Cuentas Nacionales/cnt65/CTASTRIM112.xlsx>

Banco Central del Ecuador. (2020c). *Estudio Mensual de Opinión Empresarial*.

<https://contenido.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Catalogo/Encuestas/EOE/eoe202010.pdf>

Bao, Z., Zhang, J., Wang, G., Guan, T., Jin, J., Liu, Y., Li, M., & Ma, T. (2021). The sensitivity of vegetation cover to climate change in multiple climatic zones using machine learning algorithms. *Ecological Indicators*, 124, 107443. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107443>

Brundtland, G. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. *Oxford Paperbacks*.

Bushi, L., & Meil, J. (2014). *An Environmental Life Cycle Assessment of Portland-Limestone and Ordinary Portland Cements in Concrete*. www.cement.ca

Çankaya, S., & Pekey, B. (2019). A comparative life cycle assessment for sustainable cement production in Turkey. *Journal of Environmental Management*, 249, 109362. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109362>

Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559. <https://doi.org/10.2307/2641247>

CEN. (2020). EN 15804:2012+A2:2020. *European Committee for Standardization, CEN/TC 350*.

Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., & Jullien, A. (2010). Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 18(5), 478–485. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.12.014>

Chen, W., Hong, J., & Xu, C. (2015). Pollutants generated by cement production in China, their impacts, and the potential for environmental improvement. *Journal of Cleaner Production*, 103, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.048>

Cosme, N., Koski, M., & Hauschild, M. Z. (2015). Exposure factors for marine eutrophication impacts assessment based on a mechanistic biological model. *Ecological Modelling*, 317, 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.09.005>

Damanik-Ambarita, M. N., Lock, K., Boets, P., Everaert, G., Nguyen, T. H. T., Forio, M. A. E., Musonge, P. L. S., Suhareva, N., Bennetsen, E., Landuyt, D., Dominguez-Granda, L., & Goethals, P. L. M. (2016). Ecological water quality analysis of the Guayas river basin (Ecuador) based on macroinvertebrates indices. *Limnologia*, 57, 27–59. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.01.001>

Das, S. K., Mishra, J., & Mustakim, S. M. (2018). Rice Husk Ash as a Potential Source Material for Geopolymer Concrete: A Review. *International Journal of Applied*

Engineering Research, 13(7), 81–84.

- Dauriat, A., Porté, C., Delerce, C., Guignard, C., & Adams, A. (2014). *WBCSD CSI tool for EPDs of concrete and cement: LCA core model and database report*.
- Day, C., & Day, G. (2017). Climate change, fossil fuel prices and depletion: The rationale for a falling export tax. *Economic Modelling*, 63, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2017.01.006>
- De Paula Filho, F. J., Marins, R. V., & de Lacerda, L. D. (2015). Natural and anthropogenic emissions of N and P to the Parnaíba River Delta in NE Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 166, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.03.020>
- Desmit, X., Thieu, V., Billen, G., Campuzano, F., Dulière, V., Garnier, J., Lassaletta, L., Ménesguen, A., Neves, R., Pinto, L., Silvestre, M., Sobrinho, J. L., & Lacroix, G. (2018). Reducing marine eutrophication may require a paradigmatic change. *Science of the Total Environment*, 635, 1444–1466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.181>
- Dimitriadis, B. (1989). Photochemical oxidant formation: Overview of current knowledge and emerging issues. *Studies in Environmental Science*, 35(C), 35–43. [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)70578-8](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)70578-8)
- Ding, Y., Zhao, J., Peng, W., Zhang, J., Chen, Q., Fu, Y., & Duan, M. (2021). Stochastic trophic level index model: A new method for evaluating eutrophication state. *Journal of Environmental Management*, 280, 111826. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111826>
- Domone, P., & Illston, J. (2010). Construction materials: Their nature and behaviour: Fourth edition. In *Construction Materials: Their Nature and Behaviour, Fourth Edition*. <https://doi.org/10.4324/9780203927571>
- EEA. (2019). *EEA air pollutant emission inventory guidebook*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2800/293657>
- Egüez Álava, H., Tsangouri, E., De Belie, N., & De Schutter, G. (2016). Chloride interaction with concretes subjected to a permanent splitting tensile stress level of 65%. *Construction and Building Materials*, 127, 527–538. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.009>
- EPA. (1995). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors*. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-09/documents/c00s00.pdf>
- Falkengren-Grerup, U. (1986). Soil acidification and vegetation changes in deciduous forest in southern Sweden. *Oecologia*, 70(3), 339–347. <https://doi.org/10.1007/BF00379494>
- Feiz, R., Ammenberg, J., Baas, L., Eklund, M., Helgstrand, A., & Marshall, R. (2015). Improving the CO₂ performance of cement, part I: Utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 98, 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.083>
- FICEM. (2020). *Cemento & Concreto de Iberoamérica y el Caribe*.

<https://www.ficem.org/revista-concreto-y-cemento-2020/mobile/index.html>

- Forster, P. (2003). OZONE | Role in Climate. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (pp. 1649–1655). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b0-12-227090-8/00297-9>
- Fowler, D., Cape, J. N., Coyle, M., Smith, R. I., Hjellbrekke, A. G., Simpson, D., Derwent, R. G., & Johnson, C. E. (1999). Modelling photochemical oxidant formation, transport, deposition and exposure of terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, *100*(1–3), 43–55. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00087-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00087-1)
- Gagg, C. R. (2014). Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*, *40*, 114–140. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- Galvez-Martos, J. L., & Schoenberger, H. (2014). An analysis of the use of life cycle assessment for waste co-incineration in cement kilns. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 86, pp. 118–131). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.02.009>
- García-Gusano, D., Garraín, D., Herrera, I., Cabal, H., & Lechón, Y. (2015a). Life cycle assessment of the Spanish cement industry: Implementation of environmental-friendly solutions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *17*(1), 59–73. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0757-0>
- García-Gusano, D., Garraín, D., Herrera, I., Cabal, H., & Lechón, Y. (2015b). Life Cycle Assessment of applying CO₂ post-combustion capture to the Spanish cement production. *Journal of Cleaner Production*, *104*, 328–338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.056>
- Ghosh, S. (1991). *Cement and concrete science and technology* (First, Vol. 1). ABI Books Private Limited. https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=MWNYH0AXV_0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=Cement+and+Concrete+Science+and+Technology&ots=ByOH2e3uPd&sig=TrYvDcPb_Z9q0ytKB8-mpPUqBj8
- Ghosh, S. N., & Yadav, S. N. (1996). *Energy Conservation and Environmental Control in Cement Industry* (Issue Part 1). Akademia Books International. <https://books.google.com.ec/books?id=LQdSNwAACAAJ>
- Gibbs Michael J, Soyka Peter, & Conneely David. (2001). CO₂ Emissions from Cement Production. In *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/3_1_Cement_Production.pdf
- Gmünder, S., Myers, N., Laffley, J., Rubio, L., & Belizario Silva, F. (2017). *Life Cycle Inventories of Cement, Concrete and Related Industries-Colombia and Peru for the SRI project*. <https://quantis-intl.com/>
- Godde, C. M., Mason-D’Croz, D., Mayberry, D. E., Thornton, P. K., & Herrero, M. (2021). Impacts of climate change on the livestock food supply chain; a review of the evidence. In *Global Food Security* (Vol. 28, p. 100488). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100488>

- Goedkoop, M., Heijungs, R., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2013). *ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level First edition (version 1.08) Report I: Characterisation Mark Huijbregts 3*.
- Google. (2021). *Mapa de la República del Ecuador*. Google Maps. <https://goo.gl/maps/cD1TUwpXKwj4q4RN7>
- GreenDelta. (2021). *openLCA.org | openLCA is a free, professional Life Cycle Assessment (LCA) and footprint software with a broad range of features and many available databases, created by GreenDelta since 2006 - https://www.openlca.org/*. <https://www.openlca.org/>
- Gulcebi, M. I., Bartolini, E., Lee, O., Lisgaras, C. P., Onat, F., Mifsud, J., Striano, P., Vezzani, A., Hildebrand, M. S., Jimenez-Jimenez, D., Junck, L., Lewis-Smith, D., Scheffer, I. E., Thijs, R. D., Zuberi, S. M., Blenkinsop, S., Fowler, H. J., Foley, A., Sisodiya, S. M., ... Zara, F. (2021). Climate change and epilepsy: Insights from clinical and basic science studies. *Epilepsy & Behavior*, 116, 107791. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2021.107791>
- Gursel, A. P., & Ostertag, C. (2017). Comparative life-cycle impact assessment of concrete manufacturing in Singapore. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 237–255. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1149-y>
- Habert, G., Bouzidi, Y., Chen, C., & Jullien, A. (2010). Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(6), 364–376. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.09.002>
- Henryson, K., Kätterer, T., Tidåker, P., & Sundberg, C. (2020). Soil N₂O emissions, N leaching and marine eutrophication in life cycle assessment – A comparison of modelling approaches. *Science of the Total Environment*, 725, 138332. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138332>
- Höök, M., & Tang, X. (2013). Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change-A review. *Energy Policy*, 52, 797–809. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.046>
- Hossain, M. U., Cai, R., Ng, S. T., Xuan, D., & Ye, H. (2020). Sustainable natural pozzolana concrete – A comparative study on its environmental performance against concretes with other industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 121429. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121429>
- Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, 17(7), 668–675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>
- Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. In *International Journal of Sustainable Built Environment* (Vol. 1, Issue 2, pp. 194–216). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001>
- INEC. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>

- INEC. (2012). *Proyecciones Poblacionales 2010-2020 del Ecuador*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>
- INEC. (2020). *Encuesta Nacional de Edificaciones (ENED), 2019*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Encuesta_Edificaciones/2019/3.2019_ENED_Boletin_tecnico.pdf
- International Cement Review. (2019). The Global Cement Report™ - 13th Edition. In *International Cement Review*. <https://www.cemnet.com/Publications/Item/182291/the-global-cement-report-13th-edition.html>
- International Energy Agency. (2018). *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. <https://webstore.iea.org/download/direct/1008>
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. In *Volume 3: Industrial Process and Product Use. Chapter 2: Mineral Industry Emissions*.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, & J. C. Minx (Eds.), *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415416>
- Isaksen, I. S. A., Granier, C., Myhre, G., Berntsen, T., Dalsøren, S. B., Gauss, M., Klimont, Z., Benestad, R., Bousquet, P., Collins, W., Cox, T., Eyring, V., Fowler, D., Fuzzi, S., Jöckel, P., Laj, P., Lohmann, U., Maione, M., Monks, P., ... Wuebbles, D. J. (2012). Atmospheric Composition Change: Climate-Chemistry Interactions. In *The Future of the World's Climate* (pp. 309–365). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386917-3.00012-9>
- ISO. (2006a). ISO 10396:2007. *Stationary Source Emissions - Sampling for the Automated Determination of Gas Emission Concentrations for Permanently-Installed Monitoring Systems*. <https://www.iso.org/standard/39508.html>
- ISO. (2006b). ISO 14044:2006. *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines, ISO 14044, International Organization for Standardization, 2006(7)*.
- Josa, A., Aguado, A., Cardim, A., & Byars, E. (2007). Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 781–788. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.004>
- Karentz, D., Marchi, M., & Bastianoni, S. (2018). Ozone layer. In *Encyclopedia of Ecology* (pp. 383–390). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.00883-6>
- Kitsiou, D., & Karydis, M. (2011). Coastal marine eutrophication assessment: A review on data analysis. In *Environment International* (Vol. 37, Issue 4, pp. 778–801).

Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.02.004>

- Kleijer, A. L., Lasvaux, S., Citherlet, S., & Viviani, M. (2017). Product-specific Life Cycle Assessment of ready mix concrete: Comparison between a recycled and an ordinary concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.004>
- Kosmatka, S., Panarese, W., & Kerkhoff, B. (2011). Design and Control Design and Control of Concrete Mixtures. In *Portland Cement Association* (15th ed.).
- Kowalkowski, T., Pastuszek, M., Igras, J., & Buszewski, B. (2012). Differences in emission of nitrogen and phosphorus into the Vistula and Oder basins in 1995-2008 - Natural and anthropogenic causes (MONERIS model). *Journal of Marine Systems*, 89(1), 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.07.011>
- Kurdowski, W. (2014). Cement and concrete chemistry. In *Cement and Concrete Chemistry* (Vol. 9789400779). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>
- Li, C., Cui, S., Nie, Z., Gong, X., Wang, Z., & Itsubo, N. (2015). The LCA of portland cement production in China. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(1), 117–127. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0804-4>
- Li, C., Nie, Z., Cui, S., Gong, X., Wang, Z., & Meng, X. (2014). The life cycle inventory study of cement manufacture in China. *Journal of Cleaner Production*, 72, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.048>
- Li, Y., Shang, J., Zhang, C., Zhang, W., Niu, L., Wang, L., & Zhang, H. (2021). The role of freshwater eutrophication in greenhouse gas emissions: A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 768, p. 144582). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144582>
- Lucas, R. M., Gies, P., & Neale, R. E. (2019). Eco health: Stratospheric ozone. In *Encyclopedia of Environmental Health* (pp. 205–220). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10937-6>
- Ludwig, H. M., & Zhang, W. (2015). Research review of cement clinker chemistry. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 78, pp. 24–37). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.018>
- McDermot, E., Agdas, D., Rodríguez Díaz, C. R., Rose, T., & Forcael, E. (2020). Improving performance of infrastructure projects in developing countries: an Ecuadorian case study. *International Journal of Construction Management*. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1797985>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. (1993). *Concrete. Structure, properties and materials* (Second). Prentice-Hall, Inc. <https://trid.trb.org/view/273357>
- Ménesguen, A., & Lacroix, G. (2018). Modelling the marine eutrophication: A review. *Science of the Total Environment*, 636, 339–354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.183>
- Mindess, S., & Young, J. F. (1981). *Concrete*. Prentice-Hall. https://books.google.com.ec/books?id=_7tRAAAAMAAJ
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables MERNNR, Ministerio de

- Ambiente y Agua MAAE, Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No, Renovables ARCERNNR, & Operador Nacional de Electricidad CENACE. (2020). *Factor de Emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador 2019*. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/11/factor_de_emision_de_co2_del_sistema_nacional_interconectado_de_ecuador_-_informe_2019.pdf
- Muigai, R., Alexander, M., & Moyo, P. (2013). Cradle-to-gate environmental impacts of the concrete industry in South Africa. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 55(2), 2–7. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-20192013000200001
- Nakic, D. (2018). Environmental evaluation of concrete with sewage sludge ash based on LCA. *Sustainable Production and Consumption*, 16, 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.08.003>
- Neville, Adam, & Aitcin, P. C. (1998). High performance concrete - An overview. In *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* (Vol. 31, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/bf02486473>
- Neville, AM. (1995). *Properties of Concrete* (4th ed.). <http://www.academia.edu/download/52236036/properties-of-concrete-by-am-neville.pdf>
- Onat, N. C., & Kucukvar, M. (2020). Carbon footprint of construction industry: A global review and supply chain analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109783. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109783>
- Paerl, H. W., & Piehler, M. F. (2008). Nitrogen and Marine Eutrophication. In *Nitrogen in the Marine Environment* (pp. 529–567). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-372522-6.00011-6>
- Paul, N. D. (2000). Stratospheric ozone depletion, UV-B radiation and crop disease. *Environmental Pollution*, 108(3), 343–355. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00213-4](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00213-4)
- Petroche, D. M., Ramírez, A. D., Rodríguez, C. R., Salas, D. A., Boero, A. J., & Duque-Rivera, J. (2015). Life cycle assessment of residential buildings: a review of methodologies. *The Sustainable City X*, 1, 217–225. <https://doi.org/10.2495/sc150201>
- Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M., & Graubner, C. A. (2013). Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents - Mix design principles and laboratory tests. *Cement and Concrete Research*, 51, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.011>
- Pulselli, F. M., & Marchi, M. (2015). Global Warming Potential and the Net Carbon Balance☆. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09526-9>
- Ramirez, A. D., Boero, A., Rivela, B., Melendres, A. M., Espinoza, S., & Salas, D. A. (2020). Life cycle methods to analyze the environmental sustainability of electricity generation in Ecuador: Is decarbonization the right path? *Renewable*

and Sustainable Energy Reviews, 134.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110373>

- Reimann, S., Elkins, J. W., Fraser, P. J., Hall, B. D., Kurylo, M. J., Mahieu, E., Montzka, S. A., Prinn, R. G., Rigby, M., Simmonds, P. G., & Weiss, R. F. (2018). Observing the atmospheric evolution of ozone-depleting substances. *Comptes Rendus - Geoscience*, 350(7), 384–392. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.08.008>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2020). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. In *Our World in Data*.
- Rodrigues, F. A., & Joekes, I. (2011). Cement industry: Sustainability, challenges and perspectives. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 9, Issue 2, pp. 151–166). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0302-2>
- Roem, W. J., & Berendse, F. (2000). Soil acidity and nutrient supply ratio as possible factors determining changes in plant species diversity in grassland and heathland communities. *Biological Conservation*, 92(2), 151–161. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(99\)00049-X](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(99)00049-X)
- Ross, S., Evans, D., & Webber, M. (2002). How LCA studies deal with uncertainty. In *International Journal of Life Cycle Assessment* (Vol. 7, Issue 1, pp. 47–52). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/BF02978909>
- Sagastume Gutiérrez, A., Cabello Eras, J. J., Gaviria, C. A., Van Caneghem, J., & Vandecasteele, C. (2017). Improved selection of the functional unit in environmental impact assessment of cement. *Journal of Cleaner Production*, 168, 463–473. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.007>
- Salas, D. A., Petroche Sánchez, D., Ramírez, A. D., Rodríguez, C. R., Boero Vera, A., Meléndres Palma, A., Duque-Rivera, J., Domingo, S., & Republic, D. (2015, October 1). *Defining Purpose and Scope for Environmental Analysis Life Cycle Cement in Ecuador*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.185>
- Salas, D. A., Ramirez, A. D., Rodríguez, C. R., Petroche, D. M., Boero, A. J., & Duque-Rivera, J. (2016). Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 113, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.078>
- Salas, D. A., Ramirez, A. D., Ulloa, N., Baykara, H., & Boero, A. J. (2018). Life cycle assessment of geopolymers concrete. *Construction and Building Materials*, 190, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.123>
- Sartori, T., Drogemuller, R., Omrani, S., & Lamari, F. (2021). A schematic framework for Life Cycle Assessment (LCA) and Green Building Rating System (GBRS). *Journal of Building Engineering*, 38, 102180. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102180>
- Silva, F. B., Oliveira, L. A., Yoshida, O. S., & John, V. M. (2019). Variability of environmental impact of ready-mix concrete: A case study for Brazil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323(1), 012132. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012132>

- Silva, Fernanda Belizario, Reis, D. C., Mack-Vergara, Y. L., Pessoto, L., Feng, H., Pacca, S. A., Lasvaux, S., Habert, G., & John, V. M. (2020). Primary data priorities for the life cycle inventory of construction products: focus on foreground processes. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(6), 980–997. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01762-4>
- Singh, A. K., & Bhargawa, A. (2019). Atmospheric burden of ozone depleting substances (ODSs) and forecasting ozone layer recovery. *Atmospheric Pollution Research*, 10(3), 802–807. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.12.008>
- Stafford, F. N., Dias, A. C., Arroja, L., Labrincha, J. A., & Hotza, D. (2016). Life cycle assessment of the production of Portland cement: A Southern Europe case study. *Journal of Cleaner Production*, 126, 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.110>
- Strazza, C., Del Borghi, A., Gallo, M., & Del Borghi, M. (2011). Resource productivity enhancement as means for promoting cleaner production: Analysis of co-incineration in cement plants through a life cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 19(14), 1615–1621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.05.014>
- Struijs, J., De Zwart, D., Posthuma, L., Leuven, R. S., & Huijbregts, M. A. (2011). Field sensitivity distribution of macroinvertebrates for phosphorus in inland waters. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7(2), 280–286. <https://doi.org/10.1002/ieam.141>
- Supino, S., Malandrino, O., Testa, M., & Sica, D. (2016). Sustainability in the EU cement industry: The Italian and German experiences. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 112, pp. 430–442). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.022>
- Tatari, O., & Kucukvar, M. (2012). Sustainability Assessment of U.S. Construction Sectors: Ecosystems Perspective. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(8), 918–922. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000509](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000509)
- Troxell, G. E., Davis, H. E., & Kelly, J. W. (1968). *Composition and Properties of Concrete*. McGraw-Hill. <https://books.google.com.ec/books?id=18IRAAAAMAAJ>
- Tun, T. Z., Bonnet, S., & Gheewala, S. H. (2020). Life cycle assessment of Portland cement production in Myanmar. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(11), 2106–2121. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01818-5>
- Turk, J., Cotič, Z., Mladenovič, A., & Šajna, A. (2015). Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste Management*, 45, 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035>
- United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations Sustainable knowledge platform. *Sustainable Development Goals*.
- Paris Agreement, 55 International Legal Materials (2016). <https://heinonline.org/HOL/Page?handle=hein.journals/intlm55&id=803&div=&collection=>

- United Nations. (2018). The World's Cities in 2018. In *The World's Cities in 2018 - Data Booklet (ST/ESA/SER.A/417)*.
- United Nations. (2019). World urbanization prospects - population division. In *United Nations*.
- Valderrama, C., Granados, R., Cortina, J. L., Gasol, C. M., Guillem, M., & Josa, A. (2012). Implementation of best available techniques in cement manufacturing: A life-cycle assessment study. *Journal of Cleaner Production*, 25, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.055>
- Vallero, D. A., & Letcher, T. M. (2013). Climate. In *Unraveling Environmental Disasters* (pp. 183–220). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397026-8.00008-2>
- Van Den Heede, P., & De Belie, N. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 431–442. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>
- Van der Leun, J. C. (1988). Ozone depletion and skin cancer. In *Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology* (Vol. 1, Issue 4, pp. 493–494). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/1011-1344\(88\)85010-3](https://doi.org/10.1016/1011-1344(88)85010-3)
- Van Goethem, T. M. W. J., Azevedo, L. B., Van Zelm, R., Hayes, F., Ashmore, M. R., & Huijbregts, M. A. J. (2013). Plant Species Sensitivity Distributions for ozone exposure. *Environmental Pollution*, 178, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.023>
- Vázquez-Rowe, I., Ziegler-Rodríguez, K., Laso, J., Quispe, I., Aldaco, R., & Kahhat, R. (2019). Production of cement in Peru: Understanding carbon-related environmental impacts and their policy implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.017>
- Velázquez-Martí, B., Castillo, M., Rodríguez, F., López-Cortés, I., & Alcivar-Bastidas, S. (2017). Systems of pruning on jigacho (*Vasconcellea stipulata* Badillo) under greenhouse Conditions. *HortScience*, 52(8), 1060–1064. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12058-17>
- Vieira, D. R., Calmon, J. L., & Coelho, F. Z. (2016). Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 124, 656–666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>
- Wang, Y., Zhu, Q., & Geng, Y. (2013). Trajectory and driving factors for GHG emissions in the Chinese cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 53, 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.001>
- WBCSD, Humphreys, K., & Mahasenan, M. (2002). *Towards a sustainable cement industry. Substudy 8: climate change*. <https://www.wbcSD.org/content/wbc/download/1448/18627>
- Werner, F., & Richter, K. (2007). Wooden building products in comparative LCA: A literature review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(7), 470–479.

<https://doi.org/10.1065/lca2007.04.317>

- World Bank. (2020). Global Economic Prospects, June 2020 - Pandemic, Recession: The Global Economy in Crisis. In *Global Economic Prospects, June 2020*. Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1553-9>
- World Health Organization. (2013). Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project, Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. In *World Health Organization*.
- Yan, H., Shen, Q., Fan, L. C. H., Wang, Y., & Zhang, L. (2010). Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. *Building and Environment*, 45(4), 949–955. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.09.014>
- Yang, D., Fan, L., Shi, F., Liu, Q., & Wang, Y. (2017). Comparative study of cement manufacturing with different strength grades using the coupled LCA and partial LCC methods—A case study in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 119, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.017>
- Zvereva, E. L., Toivonen, E., & Kozlov, M. V. (2008). Changes in species richness of vascular plants under the impact of air pollution: a global perspective. *Global Ecology and Biogeography*, 17(3), 305–319. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00366.x>