

**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS
Y ARTES DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA**

T E S I S

**ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DE
GASES DE EFECTO INVERNADERO
ATRIBUIBLES A LA CONSTRUCCIÓN DE
VIVIENDAS MULTIFAMILIARES DE
INTERÉS SOCIAL. CASO DE ESTUDIO.**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS
EN DESARROLLO SUSTENTABLE**

PRESENTA

MOISÉS NAZAR BEUTELSPACHER

DIRECTORES

DR. GABRIEL CASTAÑEDA NOLASCO

DR. JOEL MOREIRA ACOSTA

ÍNDICE		Página
	RESUMEN	13
1	INTRODUCCIÓN	15
2	MARCO TEÓRICO	
2.1	Principios físicos del Efecto Invernadero.	17
2.2	Evidencia científica del cambio climático.	19
2.3	Análisis del ciclo de vida de los materiales.	22
2.3.1	Metodología Input-output para el análisis de ciclo de vida.	25
2.3.2	Métodos híbridos de análisis de ciclo de vida.	30
2.4	Durabilidad de los materiales y sus efectos en las emisiones de gases de efecto invernadero.	32
3	ANTECEDENTES	
3.1	Estimaciones de emisiones de GEI por edificación.	38
3.2	Estimaciones de emisiones de GEI por producción de materiales.	45
4	OBJETIVOS E HIPÓTESIS	
4.1	Objetivo general	76
4.2	Objetivos particulares.	76
4.3.	Hipótesis	76
5	MÉTODOS	
5.1	Descripción del sitio en estudio.	77
5.2	Recopilación de información documental acerca de las viviendas de interés social construidas en el período 2008-	82

	2010.	
5.3	Metodología para la estimación de las emisiones de GEI.	85
5.3.1	Método general de análisis de emisiones de GEI para las edificaciones.	86
5.3.2	Modelo Input-output para complementar los análisis híbridos de los materiales, equipos y edificaciones.	90
5.3.3	Modelo Input-Output ampliado para la estimación de emisiones de GEI por mano de obra directa.	95
5.3.4	Análisis híbrido de ciclo de vida para la estimación de emisiones de GEI de materiales y equipos de construcción.	96
5.3.5	Método para la estimación de las emisiones de GEI atribuibles a las actividades indirectas de la mano de obra.	97
5.3.6	Método para la estimación de las emisiones de GEI por actividades de mantenimiento de las edificaciones.	98
5.3.7	Método para la estimación de emisiones de GEI por cambios en el uso del suelo.	99
5.3.8	Método para la estimación de las emisiones de GEI atribuibles a las actividades de administración de la obra.	100
5.4	Análisis de la información.	101
6	RESULTADOS.	
6.1	Análisis de las viviendas seleccionadas.	102
6.2	Cálculo de los materiales, mano de obra y equipo empleados en la edificación de cada vivienda.	102

6.3	Cálculo de la matriz inversa de Leontief para la economía mexicana del año 2003.	102
6.4	Factores de emisiones de GEI por materiales empleados en las obras.	102
6.4.1	Combustibles fósiles.	103
6.4.1.1	Gasolina.	103
6.4.1.2	Diesel.	105
6.4.1.3	Combustóleo.	106
6.4.2	Energía eléctrica.	107
6.4.3	Aceros.	115
6.4.4	Cementos.	122
6.4.5	Arena de río.	128
6.4.6	Grava triturada de 3/4”.	132
6.4.7	Concretos premezclados.	139
6.4.8	Bloques de concreto.	150
6.4.9	Madera de pino de 3ª en secciones de escuadría.	161
6.4.10	Cimbraplay.	168
6.4.11	Aluminio.	169
6.4.12	Acetileno.	169
6.4.13	Factores de emisión de GEI de otras fuentes.	171
6.5	Emisiones de GEI por materiales empleados en la obra.	
6.5.1	Edificio San Juan.	172
6.5.2	Edificio Los Poetas.	174

6.5.3	Edificio Real del Bosque.	176
6.6	Emisiones de GEI por cambios en el uso del suelo.	177
6.6.1	Edificio San Juan.	178
6.6.2	Edificio Los Poetas.	178
6.6.3	Edificio Real del Bosque.	178
6.7	Emisiones de GEI por actividades de administración.	179
6.8	Emisiones de GEI por partidas de obra.	
6.8.1	Edificio San Juan.	182
6.8.2	Edificio Los Poetas.	183
6.8.3	Edificio Real del Bosque.	185
6.9	Emisiones de GEI por metro cuadrado de vivienda.	186
6.10	Emisiones de GEI según el tipo de análisis.	
6.10.1	Edificio San Juan.	189
6.10.2	Edificio Los Poetas.	190
6.10.3	Edificio Real del Bosque.	191
6.11	Análisis y discusión de los resultados obtenidos.	193
7	CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES.	
7.1	Conclusiones.	205
7.2	Limitaciones.	206
7.3	Recomendaciones.	208
8	LITERATURA CITADA.	211

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
Tabla No. 1	Concentración en 2005 de los principales gases de efecto invernadero.	21
Tabla No. 2	Proporción de GEI según su fuente de emisión.	22
Tabla No. 3	Contribución de las fuentes de origen antropogénico a las emisiones de GEI.	22
Tabla No. 4	Tiempo de vida de edificios y materiales según Fay <i>et al</i> (2000).	33
Tabla No. 5	Tiempo de vida de edificios y materiales según Umaña (2011).	35
Tabla No. 6	Tiempo de vida de edificios y materiales según Mithraratne N y Vale B. (2004).	36
Tabla No. 7	Emisiones de GEI por tipo de vivienda según Wadel <i>et al</i> (2010).	40
Tabla No. 8	Principales ramas económicas generadoras de GEI.	93
Tabla No. 9	Factores de emisión directa por tipo de combustible.	108
Tabla No. 10	Sectores de la economía que participan en la fabricación de acero.	119
Tabla No. 11	Distancias de siderúrgicas a Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.	121
Tabla No. 12	Factores de emisiones de GEI de combustibles.	123
Tabla No. 13	Emisiones de GEI por combustión por tonelada de cemento.	123

Tabla No. 14	Consumo semanal de combustibles en la extracción de arena de río.	131
Tabla No. 15	Cálculo de las horas trabajadas por cada máquina en la extracción de arena de río.	131
Tabla No. 16	Emisiones de GEI por semana en la extracción de arena de río.	131
Tabla No. 17	Emisiones de GEI por turno de producción de grava triturada de $\frac{3}{4}$ ".	136
Tabla No. 18	Emisiones de GEI por m ³ de grava triturada de $\frac{3}{4}$ ".	138
Tabla No. 19	Coeficientes de variación de resistencias en concretos.	140
Tabla No. 20	Resistencias de concretos hechos a mano vs premezclados.	142
Tabla No. 21	Contenido de cemento de concretos premezclados.	142
Tabla No. 22	Contenido de cemento en concretos premezclados de resistencias nominales comerciales.	143
Tabla No. 23	Proporcionamientos promedios de concretos.	144
Tabla No. 24	Emisiones de GEI por materiales para concreto f'c = 100 kg/cm ² .	146
Tabla No. 25	Emisiones de GEI por materiales para concreto f'c = 150 kg/cm ² .	146
Tabla No. 26	Emisiones de GEI por materiales para concreto f'c = 200 kg/cm ² .	146
Tabla No. 27	Emisiones de GEI por materiales para concreto f'c = 250	147

	kg/cm ² .	
Tabla No. 28	Distancia en km de las plantas de concretos premezclados a las obras en análisis.	148
Tabla No. 29	Emisiones de GEI por fabricación de concretos premezclados.	149
Tabla No. 30	Factores de emisiones de GEI por fabricación de concretos premezclados.	150
Tabla No. 31	Equipos empleados en la producción de bloques de concreto.	151
Tabla No. 32	Metas diarias de producción de bloques de concreto.	151
Tabla No. 33	Proporcionamiento cemento:agregados en la producción de bloques de concreto.	153
Tabla No. 34	Cantidades de materiales requeridas por bloque de concreto fabricado.	155
Tabla No. 35	Cantidades de materiales requeridas por bloque de concreto fabricado, en unidades compatibles.	155
Tabla No. 36	Factores de emisiones de GEI de materiales que se emplean en la fabricación de bloques de concreto.	156
Tabla No. 37	Emisiones de GEI por materiales para la fabricación de un bloque hueco de 12 x 20 x 40.	156
Tabla No. 38	Emisiones de GEI por materiales para la fabricación de un bloque hueco de 15 x 20 x 40.	157
Tabla No. 39	Emisiones de GEI por materiales para la fabricación de	157

	un bloque hueco de 20 x 20 x 40.	
Tabla No. 40	Resumen de emisiones de GEI por la fabricación de bloques de concreto.	160
Tabla No. 41	Emisiones de GEI por la fabricación de bloques de concreto en función de su peso.	160
Tabla No. 42	Cantidad de carbono (C ₂₀₀₀) en las áreas de bosques de coníferas deforestados.	164
Tabla No. 43	Consumo semanal por extracción de la madera.	166
Tabla No. 44	Factores de emisión de materiales según fuentes diversas.	171
Tabla No. 45	Emisiones de GEI por materiales del edificio San Juan.	172
Tabla No. 46	Emisiones de GEI por materiales del edificio Los Poetas.	174
Tabla No. 47	Emisiones por materiales del edificio Real del Bosque.	176
Tabla No. 48	Emisiones de GEI por partidas del edificio San Juan.	182
Tabla No. 49	Emisiones de GEI por partidas del edificio Los Poetas.	184
Tabla No. 50	Emisiones de GEI por partidas del edificio Real del Bosque.	185
Tabla No. 51	Emisiones de GEI de edificaciones según diversos autores.	200

LISTA DE FIGURAS

Nombre de la Figura		Página
Figura No. 1	Esquema del análisis de ciclo de vida.	24
Figura No. 2	Materiales empleados en la construcción de diez edificios en Sevilla, España.	39
Figura No. 3	Ubicación general de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.	77
Figura No. 4	Colindancias del municipio de Tuxtla Gutiérrez.	78
Figura No. 5	Ubicación de los fraccionamientos en estudio.	80
Figura No. 6	Esquema general de análisis.	88
Figura No. 7	Gráfica de emisiones de GEI por producción de energía eléctrica.	112
Figura No. 8	Emisiones de GEI por la producción de grava triturada de ¾".	138
Figura No. 9	Contenido de cemento en el concreto hecho a mano.	141
Figura No. 10	Contenido de cemento de concretos premezclados.	143
Figura No. 11	Emisiones de GEI por materiales del edificio San Juan.	173
Figura No. 12	Emisiones de GEI por materiales del edificio Los Poetas.	175
Figura No. 13	Emisiones de GEI por materiales del edificio Real del Bosque.	177
Figura No. 14	Emisiones de GEI por partidas del edificio San Juan.	183
Figura No. 15	Emisiones de GEI por partidas del edificio Los	184

	Poetas.	
Figura No. 16	Emisiones de GEI por partidas del edificio Real del Bosque.	186
Figura No. 17	Gráfica de emisiones totales de GEI del edificio San Juan.	187
Figura No. 18	Gráfica de emisiones totales de GEI del edificio Los Poetas.	188
Figura No. 19	Gráfica de emisiones totales de GEI del edificio Real del Bosque.	189
Figura No. 20	Emisiones de GEI según el tipo de análisis efectuado. Edificio San Juan.	190
Figura No. 21	Emisiones de GEI según el tipo de análisis efectuado. Edificio Los Poetas.	191
Figura No. 22	Emisiones de GEI según el tipo de análisis efectuado. Edificio Real del Bosque.	192
Figura No. 23	Comparativa de emisiones de GEI por materiales en los edificios analizados.	193
Figura No. 24	Comparativa de emisiones de GEI por partidas en los edificios analizados.	195
Figura No. 25	Comparativa de emisiones de GEI en los edificios analizados según el tipo de análisis empleado.	196

ANEXOS

- A. Listado de conceptos y cantidades de obra de cada unidad de vivienda multifamiliar analizada.**
- B. Listado de materiales, mano de obra y equipo, empleados en cada unidad de vivienda multifamiliar.**
- C. Matriz Inversa de Leontief de la economía mexicana del año 2003.**
- D. Vector de emisiones sectoriales de GEI.**

RESUMEN.

La construcción de edificios habitacionales conlleva emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por causa de la producción de los materiales y equipos que se emplean, así como por la actividad humana de quienes participan en este proceso productivo. En esta investigación se analizan tres casos de viviendas multifamiliares edificadas en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, estimando las emisiones de GEI por metro cuadrado de edificación, considerando las etapas de edificación y mantenimiento, las emisiones por cambios en el uso del suelo, así como las actividades indirectas de las obras llevadas a cabo para la administración de las mismas. Se utilizó un método general de análisis de ciclo de vida en la modalidad híbrida para el análisis de los procesos y, las actividades que no fueron consideradas en el proceso, se complementan mediante un análisis Input-Output. Las emisiones de GEI estimadas fueron de 715 kg CO₂e/m² para el edificio San Juan, 742 kg CO₂e/m² para el edificio Los Poetas y de 843 kg CO₂e/m² para el edificio Real del Bosque. Se compararon elementos constructivos equivalentes por su función, encontrando que los muros de concreto armado impactan menos (99.34 kg CO₂e/m²) que los muros de bloques de concreto revestidos con mortero cemento-calhidra-arena (204.38 kg CO₂e/m²). Se compararon los impactos de las losas macizas coladas in situ (49.6 kg CO₂e/m²) contra el sistema de vigueta-bovedilla (46.38 kg CO₂e/m²), sin encontrar diferencias relevantes. Se identificaron a los cementos (117.78 kg CO₂e/m² en promedio) como los más impactantes por sus emisiones de GEI. El reemplazo de elementos constructivos (pinturas y recubrimientos cerámicos principalmente) durante la vida útil de los edificios se determinó como altamente impactante siendo responsable del 20.9% de las emisiones de GEI totales

determinadas. Las emisiones de GEI por cambios en el uso del suelo se estimaron con un promedio de 131 kg CO₂e/m² equivalente al 17.3% de las emisiones totales. Se identificaron problemas que deben ser investigados para continuar en la búsqueda de soluciones a los problemas ambientales derivados de la edificación de viviendas, siendo los más relevantes la falta de un modelo Input-Output para estimación de emisiones de GEI actual, congruente, detallado y completo, el desarrollo de tecnologías para viviendas urbanas que permitan disminuir las emisiones de GEI, el fuerte impacto ambiental de la madera empleada como cimbras y andamios y las emisiones por cambios en el uso del suelo.

PALABRAS CLAVE. Método híbrido de análisis de ciclo de vida, análisis Input-Output, gases de efecto invernadero, materiales y procesos de construcción, vivienda multifamiliar.

1. INTRODUCCIÓN.

La construcción y la operación de edificaciones genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que provocan problemas ambientales como el cambio climático (Gore, 2010). Las viviendas de interés social constituyen un grupo importante de las edificaciones que se construyen y operan en México, ya que se han construido de manera masiva. La operación de las viviendas provoca emisiones de GEI por el consumo eléctrico y de gas, ya que la mayoría de las centrales de generación de energía que forman la red nacional emplean combustibles fósiles que emiten importantes cantidades de GEI; por otra parte la construcción en sí de las viviendas emplea materiales cuyos procesos de producción, emiten GEI, participando de manera significativa la industria del cemento y del acero (6% y el 3% respectivamente) de las emisiones globales antropogénicas de GEI (Schmidt et al, 2008).

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas experimenta un rápido crecimiento poblacional (2.37% anual) que obliga a la construcción de nuevas viviendas, muchas de ellas dirigidas al sector social, provocando con ello emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyen al cambio climático (Gore, 2010). La presente investigación tiene como principal objetivo analizar esta problemática mediante el análisis de los insumos (materiales, mano de obra y equipos) requeridos para la construcción de viviendas de interés social en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, determinando las emisiones de GEI de cada insumo por medio de un método híbrido de análisis de ciclo de vida. Se seleccionaron tres tipos de edificios construidos en el período 2008-2010 y con base en los resultados obtenidos se identificaron a los materiales más impactantes, se compararon las emisiones de GEI de los elementos

constructivos equivalentes por su función y se determinaron las participaciones de los cambios en el uso del suelo, mantenimiento y actividades indirectas de la construcción en su participación de las emisiones de GEI de los edificios.

El conocimiento de los impactos de las diferentes alternativas constructivas que se emplean localmente en la edificación de viviendas de interés social es importante porque permite conocer las diferencias, en cuanto a las emisiones de GEI, de las diversas opciones constructivas. Con base en este conocimiento es factible proponer acciones destinadas a la mitigación de éstas. Los resultados de esta investigación brindan información local y actual que puede servir de referencia para el desarrollo de medidas de mitigación de emisiones de GEI por la edificación de viviendas de interés social que se construyan en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 Principios físicos del Efecto Invernadero

El efecto invernadero es un fenómeno físico que permite que la atmósfera retenga parte de la energía radiante que le llega desde el Sol. Gracias a este fenómeno la superficie terrestre logra mantener la temperatura media planetaria, con un gran gradiente térmico respecto al espacio vacío circundante, que tiene temperaturas del orden de $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$, a través del flujo de energía proveniente del Sol; esta radiación solar, tiene una intensidad aproximada 1.367 kW/m^2 (Plasencia et al, 2007), medida perpendicularmente a su flujo antes de entrar a la atmósfera terrestre.

Las radiaciones solares comprenden diferentes longitudes de onda, que van de los 275 nm a los 4,900 nm (Fröhlich y Lean, 2004), siendo las ondas de longitud muy corta, correspondientes a los rayos ultravioleta (170-400 nm), interceptadas en su mayor parte (99%) por una delgada capa atmosférica que contiene moléculas de ozono (O_3), el resto de la radiación pasa a través de la atmósfera (sin nubes) sin alterarla sustancialmente. Al llegar las ondas cortas a la superficie terrestre, sea en la masa continental o en las masas de agua, la energía es absorbida, calentando la superficie y emitiendo a su vez hacia la atmósfera radiación en forma de ondas largas o radiación infrarroja. Esta radiación no puede escapar totalmente hacia el espacio porque los gases termoactivos, llamados también gases de efecto invernadero (GEI), de la atmósfera los atrapan, calentándose a su vez y remitiendo hacia abajo y hacia arriba radiación térmica. Este fenómeno es el que provoca que las capas inferiores de la tropósfera sean más calientes que las superiores, hasta alcanzar el límite de la misma, ya que es la superficie terrestre la que calienta a la atmósfera.

Del balance energético planetario se tiene que de la radiación solar que incide sobre la Tierra, el 32% se difunde al espacio, el 15% se absorbe en la atmósfera y el 53% se absorbe por la superficie de la tierra; de la fracción que absorbe la superficie terrestre el 47% de la radiación solar incidente es retenida por la superficie terrestre y el 6% es reflejado al espacio exterior (Lacomba, 1991).

Por otra parte la radiación reflejada hacia la atmósfera, de la cual una parte logra difundirse en el espacio exterior, depende del albedo de la Tierra. Esta reflectividad media depende de las superficies sobre las que la radiación solar incide, siendo las superficies más reflejantes la nieve y el hielo que tienen un albedo de hasta el 90% (Gore, 2010).

Los gases de efecto invernadero, presentes en la atmósfera son: el vapor de agua, el bióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), perfluorocarbonos (PFC), hidrofluorocarbonos (HFC) y el hexafluoruro de azufre (SF_6), (López, 2009). Además de estos GEI existen otros como los clorofluorocarbonos (CFC), responsable además de manera muy importante de la pérdida de la capa de ozono en la estratósfera. El propio ozono (O_3), cuando actúa en las capas bajas de la atmósfera contribuye de manera importante al efecto invernadero y funge también como un contaminante que afecta la salud humana y a los bosques y cultivos (Harte et al, 1995; Albert, 1998).

El bióxido de carbono CO_2 , es el principal gas de efecto invernadero por los efectos que tiene sobre la atmósfera, ya que el incremento en las concentraciones de CO_2 en la atmósfera incrementa la capacidad de retención de la atmósfera de vapor de agua y como el vapor de agua es un gas de efecto invernadero muy potente, la concentración de CO_2 afecta de manera muy relevante el efecto invernadero

(Flannery, 2008). En el balance térmico de la Tierra el calor que entra a la Tierra es mayor que el que ésta devuelve al espacio, a razón de 0.9 vatios por metro cuadrado lo que provoca el calentamiento adicional (Gómez y Romanillos, 2012).

2.2 Evidencia científica del cambio climático.

Como evidencia del cambio climático producido por el incremento en las concentraciones de los GEI en la atmósfera se tienen dos pilares:

- a) Por una parte la evidencia científica de que la concentración de GEI contribuye a la capacidad de la atmósfera de interferir con la ruta de la energía calórica que trata de escapar al espacio desde la superficie terrestre propiciando un efecto cíclico que incrementa la temperatura en la Tierra (López, 2009); los primeros trabajos científicos acerca del equilibrio térmico en el planeta y de la importancia de la atmósfera en éste fueron de Pierre Fourier en 1827; para demostrar el efecto invernadero natural de la atmósfera diseñó un experimento con un dispositivo semejante a un invernadero. Estos trabajos sirvieron de base para los que en 1860 realizara John Tyndall quien experimentó con el efecto de radiaciones de amplitudes de onda distintas al pasar por diferentes gases, al experimentar con dióxido de carbono y vapor de agua, encontró que son altamente absorbentes de algunas partes del espectro infrarrojo. El siguiente avance científico en este campo provino del químico sueco Svante Arrhenius quien estimó el cambio en la temperatura atmosférica causada por emisiones industriales (1896), con base en sus cálculos determinó que una disminución de la mitad de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera implicarían una caída de 5°C y que un incremento del doble de la concentración de este gas provocaría un incremento en la temperatura global

de 5°C, suponiendo estos cálculos un avance impresionante pues sus resultados son muy similares a los obtenidos hoy en día con el apoyo de modelos sofisticados y supercomputadores.

- b) La medición de las temperaturas y concentraciones de CO₂ en el planeta. Se empezaron a apreciar los incrementos en las concentraciones de CO₂ en mediciones hechas en Mauna Loa, Hawái a partir del año 1958; de estas mediciones se apreciaron dos efectos: por una parte una variación estacional llamada Curva de Keeling o “diente de sierra”; por otra parte se observó un crecimiento sostenido de las concentraciones desde alrededor de 315 ppm en 1958 hasta una concentración de 380 ppm para el año 2005. Estos incrementos en las concentraciones de CO₂, conllevan necesariamente incrementos en la temperatura global del planeta (Flannery, 2008). Por otra parte se han efectuado mediciones directas de la temperatura en la superficie terrestre que indican un aumento en el promedio de las temperaturas en los últimos 160 años, siendo este efecto más pronunciado en los últimos 40 años y se observa además que las regiones terrestres se están calentando más rápido que los océanos y adicionalmente se observa un mayor incremento en las temperaturas de las regiones de latitudes más septentrionales (IPCC, 2007). Otras evidencias científicas son el incremento en los niveles medios de los océanos que se estiman en 18 cm en el período comprendido entre los años 1870 al año 2000, así como la pérdida de las extensiones de nieve y hielo que a su vez generan un ciclo de retroalimentación positiva por efectos del albedo.

Las emisiones de GEI son de origen natural y humano. De estos gases los primeros (CO_2 , CH_4 , N_2O) existen de manera natural y sus concentraciones se han visto incrementadas por efecto antropogénico, mientras que los otros gases (PFC, HFC, SF_6) son producidos exclusivamente por la actividad humana (Flannery, 2008).

De acuerdo con el Cuarto Informe del IPCC (2007) las concentraciones de los principales GEI, medidas en el año 2005 eran las siguientes:

Tabla No.1 Concentración en 2005 de los principales gases de efecto invernadero.

Gases de Efecto Invernadero	Concentración en la atmósfera
Bióxido de carbono (CO_2)	379 ppm
Metano (CH_4)	1.774 ppm

Fuente: Cuarto Informe del IPCC, 2007.

Al contrastar los valores de la concentración de CO_2 en la atmósfera en la época preindustrial (antes de 1750) en la que se tenían 280 ppm (López, 2009) con la concentración reportada en el 2005 (IPCC) es evidente un incremento del 35% en la concentración de dicho gas.

Este incremento en las concentraciones de GEI ha impactado en el flujo de calor que llega a la superficie terrestre, incrementándose por efecto de los GEI y disminuyendo por la acción de los aerosoles, siendo el efecto neto antropogénico sobre la radiación solar en la superficie de la Tierra de 1.6 W/m^2 (IPCC, 2007).

En términos de temperatura el promedio mundial de ésta se ha incrementado en 0.74°C en el período de 1906 a 2005 (IPCC, 2007) provocando efectos climáticos globales.

Debido a que cada GEI tiene diferentes capacidades de calentamiento mundial a lo largo de 100 años, se ha optado por establecer como parámetro el potencial de

calentamiento que tienen las emisiones de CO₂, indicando las contribuciones de cada GEI en su equivalente de CO₂. Siguiendo este procedimiento el Cuarto Informe del IPCC establece los siguientes valores en las emisiones de GEI:

Tabla No. 2: Proporción de GEI según su fuente de emisión.

Fuente de emisión de gases de efecto invernadero	Proporción de GEI en 2004 en términos de CO₂ equivalente.
CO ₂ de combustibles fósiles	56.6 %
CO ₂ de deforestación, degradación de biomasa, etc.	17.3 %
CO ₂ de otras fuentes	2.8 %
CH ₄	14.3 %
N ₂ O	7.9 %
Gases-F	1.1%

Fuente: Cuarto Informe del IPCC, 2007.

Tabla No. 3: Contribución de las fuentes de origen antropogénico a las emisiones de GEI.

FUENTE DE GEI	Contribución a las emisiones totales de GEI de origen antropogénico
Suministro de energía	25.9 %
Industria	19.4 %
Silvicultura	17.4 %
Agricultura	13.5 %
Transporte	13.1 %
Edificios residenciales y comerciales	7.9 %
Desechos y aguas de desechos	2.8 %

Fuente: Cuarto Informe del IPCC, 2007.

2.3 Análisis del ciclo de vida de los materiales.

El análisis del ciclo de vida de los materiales y servicios (ACV) es un proceso objetivo de evaluación de los impactos ambientales que se asocian a un producto, proceso o actividad; en este análisis se identifican y cuantifican el uso de materia y energía así como las emisiones al entorno, de modo que se puedan llevar a cabo estrategias prácticas de mejora ambiental (Díaz y Escárcega, 2009).

Este análisis considera el ciclo completo del producto, proceso o actividad, desde la extracción de la materia prima, su procesamiento, los procesos de producción, transporte, distribución, uso y mantenimiento, hasta su reutilización, reciclado, demolición y disposición de residuos (Crawford, 2011).

Como una parte del ACV se realiza el análisis del Inventario de Ciclo de Vida (ICV o LCI por sus siglas en inglés)–que no es más que una lista cuantificada de todos los flujos entrantes y salientes de materia y energía del sistema durante su vida útil. Para llevar a cabo los procedimientos de manera estandarizada la Organización Internacional de Estandarización (ISO por sus siglas en inglés) desarrolló las normas ISO 14040 en las que establece: “El ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos de estudio¹”.

El ACV se realiza mediante un proceso de cuatro pasos en los que la información se retroalimenta entre cada bloque de proceso que se realiza. El esquema de este proceso es el siguiente:

¹ www.iso.org

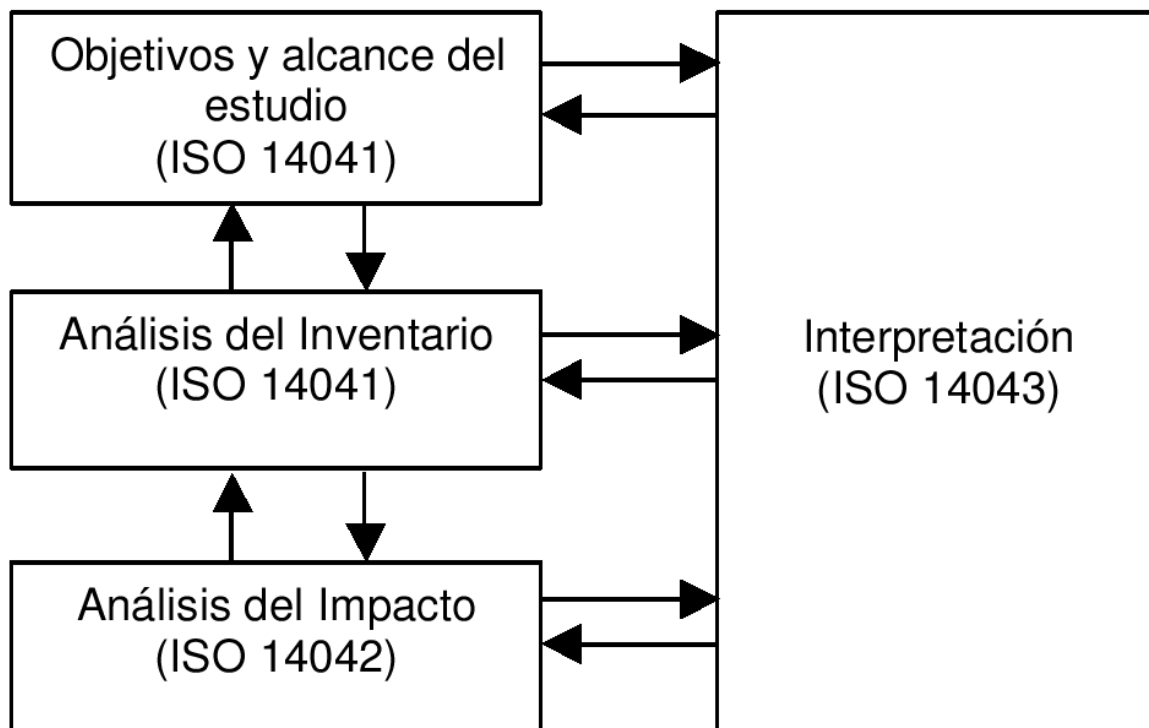


Figura No. 1: Esquema del análisis de ciclo de vida.

Fuente: www.iso.org.

Los alcances de los ACV dependen en gran manera del objetivo de este análisis.

Las emisiones de GEI se estiman siguiendo diversos enfoques, que van desde la medición directa o estimada de las emisiones que se provocan en el sitio donde se realiza una actividad, como en el caso de la medición de GEI en el escape de un motor de combustión interna o de una chimenea, hasta enfoques que consideran todas las emisiones de GEI atribuibles a un producto a lo largo de su ciclo de vida, sumando a las emisiones directas las indirectas. Para acotar estos enfoques se definen los alcances del análisis de las emisiones. La Oficina Catalana Para El Cambio Climático (2011) define a los alcances de la siguiente manera:

Alcance 1. Emisiones Directas: Son las emisiones causadas por la actividad en estudio en el sitio donde se realiza la actividad. Se relaciona principalmente con las

emisiones de combustión de calderas, motores y de vehículos que quien realiza la actividad posee o controla.

Alcance 2. Emisiones indirectas de la generación de electricidad y calor: Son las emisiones generadas en los procesos de producción de electricidad, calor o frío fuera de las instalaciones de quien realiza la actividad en análisis.

Alcance 3. Otras emisiones indirectas: Son las emisiones atribuibles a las actividades del sujeto que provienen de fuentes que no son propiedad o no son controladas por el mismo. Son ejemplos de estas las emisiones debidas a materiales adquiridos, viajes de trabajo, transporte de materias primas y utilización de productos y servicios.

En la definición de los alcances es preciso, siguiendo la metodología de análisis de procesos, delimitar que procesos previos (upstream) al principal analizado se tomarán en cuenta (extracción de materias primas, transporte de las mismas, etc.), por otra parte se deben delimitar en el análisis los procesos posteriores a la fabricación del producto (downstream), si se considerará la etapa de uso y disposición final o reciclaje del producto (criterio de la cuna a la tumba o cradle to grave) o bien si se considerarán las emisiones producidas únicamente hasta la terminación del producto (criterio de la cuna a la puerta o cradle to gate).

2.3.1 Metodología Input-Output.

Según Leontief (1987) el análisis Input-Output es una extensión práctica de la teoría clásica de la interdependencia general en la cual se ve a una economía completa de una región, país o incluso del mundo entero como un sistema simple que pretende describir e interpretar su operación en términos de relaciones estructurales básicas y observables.

Miller y Blair (2009) definen al análisis Input-Output como el sistema analítico desarrollado por Wassili Leontief en la década de 1930 y que tiene por propósito analizar la interdependencia de las industrias en una economía. En su forma más básica este análisis consiste en un sistema de ecuaciones lineales cada una de las cuales describe la distribución de un producto industrial a través de la economía.

La aplicación del método Input-Output a la evaluación ambiental tiene sus orígenes en la década de los '60s con el desarrollo que Leontief (1970) hizo para estos fines.

Miller y Blair (2009) describen tres tipos diferentes de modificaciones al modelo Input-Output para su aplicación a la evaluación ambiental:

- Modelo generalizado Input-Output: Se forma incrementando la matriz de coeficientes técnicos con filas y/o columnas que representan la producción de contaminación y el abatimiento de recursos. Explora dos aplicaciones: evaluación de impactos ambientales y planificación.
- Modelos Económico-Ecológicos: Estos modelos se forman al extender el marco interindustrial para incluir sectores industriales de ecosistemas, registrando los flujos entre los sectores económicos y los sectores de ecosistemas a lo largo de las líneas de un modelo interregional Input-Output.
- Modelo de insumos por industria. Este modelo expresa los factores ambientales como insumos en una matriz de insumo-producto.

En este tipo de análisis se determinan los impactos ambientales correspondientes al ciclo de vida de un producto a partir de los costos involucrados en la elaboración del mismo. Para efectuar este análisis se debe disponer de los datos de las

transferencias económicas entre los diversos sectores que componen la economía de un país o una región. Esta información macroeconómica se resume en una matriz de insumos-productos que mediante un procedimiento matemático nos lleva a la obtención de la Matriz Inversa de Leontief que es la base de los cálculos en conjunto con los vectores de datos de impactos ambientales de cada sector de la economía. Las unidades que se emplean son monetarias. Este tipo de análisis padece de varios problemas, por una parte tiene un problema de agregación, ya que asigna a un sector de la economía valores iguales de sus impactos ambientales para sus productos con el mismo precio, situación que origina una falta de precisión. Por otra parte los precios a menudo sufren grandes variaciones que pueden ser fuente de error en la cuantificación de los impactos ambientales. Otra fuente de error proviene de que en el estudio de los impactos ambientales derivados de la fabricación de un producto a menudo se importan insumos de otros países, situación que no se considera en el método input-output y que conlleva imprecisiones por las diferencias en los impactos ambientales entre los países y por los impactos ambientales debidos al transporte de estos insumos entre países. En la aplicación del método Input-Output son consideradas todas las emisiones durante el proceso productivo (Miller y Blair, 2009), por lo que pierde sentido la delimitación de los procesos que intervienen en la fabricación del producto, debiendo definirse únicamente si se considerarán las etapas de uso y disposición final o no.

La base matemática del método Input-Output para la estimación de emisiones de GEI parte de la consideración de que las emisiones de GEI ocasionadas por la producción de un producto determinado son proporcionales, en función de su costo, a las emisiones directas (Alcance 1) de GEI del sector al que pertenece. Por otra

parte para la fabricación de ese producto el sector al que pertenece demanda a los demás sectores de la industria ciertas cantidades de insumos, que para su producción emitirán a su vez gases de efecto invernadero. Este proceso se repite indefinidamente, acumulándose en cada etapa nuevas emisiones de GEI atribuibles a la fabricación del producto en estudio (Haro, 2008). Matemáticamente este proceso se expresa de la siguiente manera (Tarancón y Del Río, 2004):

Se definen:

X: Vector de producción total de un sector económico.

Y: Vector de demanda final a un sector económico.

A: Matriz de coeficiente técnicos de transacciones entre los sectores económicos obtenida al dividir cada columna de la Matriz de Insumo-Producto entre la producción total de ese sector.

E: Vector de emisiones de GEI de los sectores económicos.

$$\mathbf{X} = \mathbf{AX} + \mathbf{Y}$$

Esta ecuación nos indica que la producción total de un sector de la economía es igual a la producción necesaria para abastecer a los demás sectores más la producción necesaria para abastecer a los compradores finales.

Despejando de esta ecuación a **X** tendremos:

$$\mathbf{X} - \mathbf{AX} = \mathbf{Y}$$

$$\mathbf{X} (\mathbf{I} - \mathbf{A}) = \mathbf{Y}$$

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{Y}$$

A la matriz $(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}$ se le conoce como Matriz Inversa de Leontief.

Si a la economía se le demanda un producto, esto se representaría mediante el vector \mathbf{Y} , en el que todos sus elementos serían nulos excepto el correspondiente al sector al que pertenece el objeto que se demanda, teniendo esta celda el valor del costo del objeto.

El resultado de la operación $\mathbf{X} = (\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{Y}$ es el vector \mathbf{X} que nos proporciona el listado de la producción de cada sector de la economía requerido para la producción del objeto demandado.

Si este vector de producción total se multiplica por las emisiones de GEI correspondientes a cada peso producido por cada sector económico, se obtienen las emisiones totales de GEI atribuibles a la producción del objeto demandado.

$$\mathbf{e} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{X}$$

Pudiendo presentarse esta relación de la manera siguiente:

$$\mathbf{e} = \mathbf{E} \cdot (\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{Y}$$

Esta ecuación es un caso particular de la ecuación general presentada por Miller y Blair (2009):

$$\mathbf{X}^p = [\mathbf{D}^p\mathbf{L}]\mathbf{f}$$

En la que:

\mathbf{X}^p es el vector de impactos ambientales.

\mathbf{D}^p es la matriz de coeficientes de impactos ambientales por unidad monetaria.

\mathbf{L} es la Matriz Inversa de Leontief.

f: Es el vector de demanda final a la economía.

Para el caso de la economía mexicana se cuenta con la Matriz Insumo-Producto calculada para el año 2003. Esta matriz describe las interrelaciones entre los sectores de la economía mexicana, considerando un total de 79 subsectores. De esta matriz se obtiene la matriz A de coeficientes técnicos, la metodología empleada es la definida por Haro (2008) quien emplea la siguiente fórmula:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} * \text{diag}(\mathbf{q})^{-1}.$$

Siendo:

A: Matriz de coeficientes técnicos.

U: Matriz de Insumo-Producto.

q: Producción total igual al uso total.

Esta fórmula expresa simplemente la división de cada columna de la Matriz Insumo-Producto entre la producción total correspondiente a esa columna.

2.3.2 Métodos híbridos.

Este tipo de análisis combina los dos procesos anteriores, lo que en la práctica ha llevado al desarrollo de varios tipos de análisis híbridos. En general, un buen análisis híbrido subsana, al menos parcialmente, las deficiencias de los dos métodos de análisis en los que se basa. De acuerdo con Bilec (2007) se distinguen los métodos híbridos siguientes:

- Análisis estratificado (tiered analysis). En este método se emplea de manera iterativa el método input-output, descomponiendo un producto complejo en

partes que pueden ser asignadas con cada vez mayor precisión a los sectores de la industria.

- Método de desagregación o incremento de sectores económicos. Se busca en este método estimar los impactos ambientales debidos a la fabricación de un producto mediante la adición de un nuevo sector (para el caso en el que el producto no pueda considerarse parte de ningún otro sector existente) o bien mediante la desagregación de un sector en subsectores más específicos.
- Método híbrido integrado. En este método Suh (2004) combina matrices tecnológicas que emplean unidades físicas, con matrices de coeficientes técnicos que emplean unidades monetarias, ligando matemáticamente a las dos matrices por medio de relaciones deducidas del modelo teórico que relaciona las fronteras entre los intercambios físicos y los monetarios. Este se considera el mejor modelo desde el punto de vista matemático, sin embargo requiere de mucho esfuerzo y tiempo para su realización práctica.
- Análisis de procesos incrementado: Consiste en el empleo del método de análisis de procesos en lo general, complementando las actividades que no son consideradas en el análisis de procesos por medio del método Input-Output en el análisis. Se consideran las etapas de fabricación de los materiales, construcción, operación, mantenimiento y fin de vida.

Se han desarrollado métodos alternativos para el análisis de flujos de materia y energía y la generación de contaminantes. El método de análisis basado en agentes (ABM) ha sido propuesto (Heiret et al, 2012) al área ambiental en conjunto con un método híbrido de análisis de ciclo de vida para evaluar a la industria bio-energética

de los Estados Unidos de Norteamérica, planteando este método como la alternativa para subsanar las deficiencias que aun presentan los métodos híbridos de ACV en la evaluación a pequeña escala y la variabilidad de parámetros.

2.4 Durabilidad de los materiales y sus efectos en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Debido a la degradación natural de los materiales (aceros, concretos, madera, cerámica, etc.) y a los eventos accidentales, tales como: sismos, huracanes, hundimientos de tierras e incendios, las edificaciones tienen una vida útil, que si bien no es posible predecir con precisión, puede ser estimada. Las edificaciones durante vida útil requieren únicamente de trabajos de mantenimiento, sin que la estructura principal deba ser reconstruida o reforzada. Una vez que esta vida útil se termina es cuando se presenta un deterioro estructural importante y como consecuencia la edificación debe ser demolida o reparada y/o reforzada. Si se opta por efectuar los trabajos de reparación y/o reforzamiento, la edificación gozará de un periodo adicional de vida durante una etapa que será su vida residual. Los trabajos de reparación y/o mantenimiento pueden prolongar la vida de una edificación durante un período que dependerá sobre todo de la tasa de deterioro de los materiales que constituyen la estructura, así como de la seguridad que ésta presente ante los eventos accidentales extremos.

Las durabilidades que las edificaciones y materiales tienen han sido estimadas por diversos autores:

- De acuerdo a Fay et al (2000) las durabilidades de los edificios y algunos de sus componentes son:

Tabla No. 4 Tiempo de vida de edificios y materiales según Fay et al (2000).

Material	Años de vida
Edificio	100
Pintura	10
Ventanas	50
Sistemas eléctricos e hidrosanitarios	50
Accesorios	20
Techumbres	37.5

- Erlandsson y Borg (2003) consideraron en su propuesta metodológica de análisis genérico de ciclo de vida para edificaciones un tiempo de vida de entre 50 y 75 años.
- Peris M (2005) en un estudio acerca de la sustentabilidad y la calidad de los materiales de construcción, consideró que la vida de un edificio de concreto o con partes estructurales importantes de concreto era de 50 años.
- Komatsu et al (1994) calcularon, mediante estadísticas y empleando distribuciones de probabilidad, el tiempo de vida de diversas edificaciones, encontrando que para la viviendas de concreto en Japón, el tiempo de vida en promedio es de 50.6 años.
- Lippke et al (2004) en un estudio comparativo impactos ambientales de viviendas de madera contra viviendas de estructura de acero y de concreto en dos ciudades de los EUA, consideraron una vida de los edificios de concreto reforzado de 75 años.

- Abitante et al (2007) en un estudio sobre la vida útil y el desempeño de pisos cerámicos considera que la vida útil de un edificio es de 75 años, mientras que los recubrimientos cerámicos tienen una vida útil mayor a 10 años en el caso de baldosas con desempeño mínimo, para el caso de baldosas con nivel de calidad intermedio una vida útil superior a 15 años y para las baldosas de calidad superior una vida útil mayor a los 20 años.
- Benveniste et al (2011) analizaron los trabajos de análisis de ciclo de vida de las losetas cerámicas en Europa y con base en los resultados obtenidos elaboraron un ACV de las losetas cerámicas con valores promedio, considerando las fases de fabricación, uso y demolición. En este estudio consideraron una vida útil para las losetas y para los edificios de 50 años.
- Vázquez M. (2001) en la presentación de los resultados de su estudio de la sostenibilidad de los materiales de construcción, considera que la durabilidad de un edificio nuevo común es de 50 años, y que ésta podría incrementarse a 100 años mediante diseños de edificios de durabilidad mejorada.
- Rocha-Tamayo E. (2011) presenta una revisión de los procesos de certificación ambiental existentes en el mundo, las características que deben tener los materiales para poder considerarlos sostenibles y los sistemas de evaluación ambiental mediante ACV. En este estudio considera que la vida de un edificio varía entre 50 y 75 años.
- Hernández-Castañeda O y Mendoza-Escobedo C (2006) analizan las ventajas del diseño por durabilidad en las estructuras de concreto, considerando que estas tienen de manera normal 50 años de vida útil y que sin embargo en

zonas de alta exposición salina o a otros agentes esta vida puede disminuir hasta los 20 años.

- Maldonado N et al (2005). Analizan la influencia de la durabilidad en el cálculo y diseño de viviendas de interés social en la Provincia de Mendoza en Argentina. Consideran que la vida útil de un edificio de concreto es de 50 años aun cuando la normativa local solo les exige 30 años de vida útil.
- Umaña M (2011) en su trabajo final (tesina) de Master en Arquitectura y Sostenibilidad de la UPC estudia la sostenibilidad de varios materiales de construcción. En este estudio considera las siguientes durabilidades estimadas:

Tabla No. 5 Tiempo de vida de edificios y materiales según Umaña (2011).

Material	Años
Ciudades	500
Obras de infraestructura	100
Edificios	50
Instalaciones	20
Acabados	10

- John S et al (2009) estudiaron el impacto ambiental de edificios de varios pisos, considerando diferentes materiales (concreto, acero y madera). Para su estudio aplicaron análisis de ciclo de vida cuantificando la energía primaria embebida y las emisiones de GEI. Para todos los casos analizados consideraron una vida de los edificios de 60 años.

- Mithraratne N y Vale B. (2004) en su trabajo describen un método que fue desarrollado en la Universidad de Auckland para el análisis de ciclo de vida detallado en viviendas individuales en New Zealand basado en los requerimientos de energía operacional y embebida. En este estudio menciona que aunque en muchos casos la durabilidad de los edificios se considera de entre 25 y 50 años, las durabilidades de los edificios pueden ser de hasta 100 años, considerando el mantenimiento adecuado y el reemplazo de algunos de sus elementos. Un resumen de las durabilidades que consideran en este estudio se presenta en la tabla siguiente:

Tabla No. 6 Tiempo de vida de edificios y materiales según Mithraratne N y Vale B. (2004).

Material	Años
Edificios	100
Instalaciones eléctricas	50
Puertas y ventanas de aluminio y cristales	60
Plomería de agua caliente	16
Accesorios sanitarios	30
Tubos de cobre y PVC	50
Papeleras y toalleras	20
Pisos cerámicos	30
Pintura de recubrimientos, puertas y techos	8
Actualizaciones de cocinas	30

- Crawford R. (2011) considera para los edificios una vida útil de 50 años, al igual que para los ladrillos de arcilla, aislamientos de fibra de vidrio, morteros, muros metálicos y la madera suave interior. Para la madera dura exterior considera una durabilidad de 25 años y para las pinturas basadas en agua una durabilidad de 15 años.

De acuerdo a los requerimientos de diseño por durabilidad, las estructuras de concreto en condiciones normales de exposición tienen una vida útil de 50 años (Arnal y Betancourt, 2007) y pueden llegar a durar hasta 100 años si se diseñan y construyen con una durabilidad mejorada (Vázquez, 2001). Al término de su vida útil inicia la vida residual del edificio (Torres y Martínez, 2001), en esta etapa los usuarios se encontrarán en la disyuntiva entre dejar que el edificio se termine de deteriorar o bien de repararlo en sus aspectos estructurales con los altos costos que esto implica.

3 ANTECEDENTES.

3.1 Estimaciones de emisiones de GEI por edificación.

Se han realizado numerosos estudios de emisiones de GEI en edificaciones. Estos estudios por lo general difieren en cuanto a los alcances considerados, a la definición de sus fronteras e incluso en cuanto a la unidad funcional que emplean para los análisis, lo que dificulta la comparación directa de los resultados obtenidos. Algunos de los resultados obtenidos son los siguientes:

- Bellart y Mesa (2009), estudiaron la edificación de tres tipos diferentes de viviendas en España: Un edificio antiguo, una vivienda de bajo consumo y una vivienda pasiva. Cada tipo de edificación fue de 100 m² y consideraron una vida útil de 100 años, se considera en su análisis la etapa de uso. Obtuvieron los valores de emisiones de CO₂ siguientes: 16.6 kg CO₂/m²/año para las viviendas pasivas, 35.5 kg CO₂/m²/año para la vivienda de bajo consumo y 113 kg CO₂/m²/año para el edificio antiguo.
- Mercader et al (2012) analizaron las emisiones de GEI debidas a la edificación por los recursos materiales consumidos en su ejecución.

Para este análisis consideran las emisiones de GEI de diez proyectos de construcción en la ciudad de Sevilla, España. Los modelos de edificios son de 4 plantas sobre el piso más un sótano. Los edificios son para viviendas. Los edificios se conforman con cimentación mediante losa de concreto armado, columnas de concreto armado con muros de ladrillos divisorios y cancelería de aluminio. Seleccionaron edificios que solicitaron licencia para ser construidos entre 2003 y 2010. La base de datos empleada para los factores de emisión fue la del BEDEC. Las emisiones por metro cuadrado calculadas fueron de

694.16 kg CO₂e/m². La distribución de las emisiones de acuerdo a los materiales empleados fue:

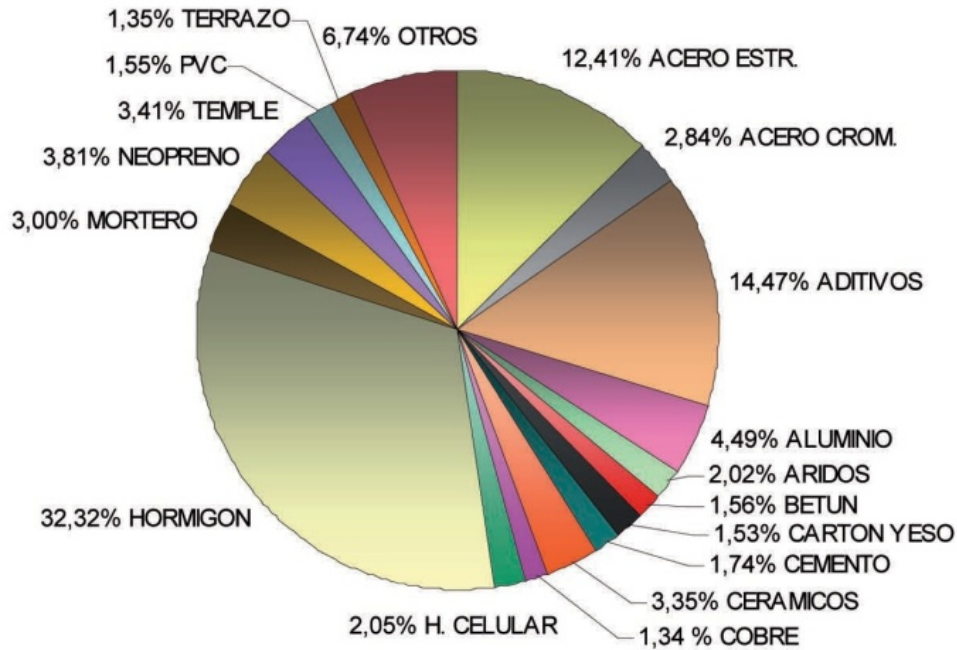


Figura No. 2: Materiales empleados en la construcción de diez edificios en Sevilla, España.

- Wadel et al (2010) proponen un modelo de construcción modular ligera, con materiales reciclados y reciclables. Las emisiones estimadas de GEI, de acuerdo a cinco tipos constructivos diferentes, por la edificación de un metro cuadrado de vivienda son:

Tabla No. 7 Emisiones de GEI por tipo de vivienda según Wadel et al (2010).

Tipo de vivienda	Emisiones por Etapa (kg CO ₂ e/m ²)					
	Extracción y fabricación	Transporte	Construcción	Uso	Mantenimiento	Derribo
Convencional	600	10	40	800	50	40
Modular de hormigón armado	610	10	0	700	50	5
Modular de acero	710	10	0	790	100	5
Modular de madera	290	30	0	650	195	5
Modular optimizada	180	10	0	495	20	5

- Sabate y Peters (2011) presentan una metodología para evaluar viviendas considerando los impactos ambientales a lo largo de su ciclo de vida por medio de la iniciativa LIMA (Low Impact Mediterranean Architecture). A modo de comparación presentan las emisiones por edificación de diversos modelos de construcción, considerando una vida útil de 50 años. Las emisiones de GEI por metro cuadrado de edificación (incluyendo mantenimiento) son las siguientes:

Vivienda actual: 1,130 kg CO₂e/m².

Vivienda de alta eficiencia energética: 800 kg CO₂e/m².

Vivienda de alta eficiencia energética

Con reducción de la energía incorporada: 205 kg CO₂e/m².

La base de datos mayormente empleada fue la del BEDEC.

- Fay et al (2000) analizan el consumo de energía en las edificaciones durante su ciclo de vida, obteniendo para la vivienda analizada un consumo inicial por edificación de 14.1 GJ/m² y 9.4 GJ/m² por mantenimiento. La vivienda analizada llamada “Green Home”, es una edificación de dos niveles, diseñada con características para el ahorro energético, como el doble acristalamiento de ventanas. Esta vivienda se ubica en Victoria, Australia, en un clima templado. El método de análisis fue ACV mediante Input-Output. La equivalencia energética en términos de emisiones de GEI para Australia es, de acuerdo con Crawford (2011), de 60 kg CO₂e/GJ. Por lo que efectuando las conversiones tendremos que las emisiones serían:

Edificación: 846 kg CO₂e/m².

Mantenimiento: 564 kg CO₂e/m².

- Crawford (2001) analiza los siguientes casos:

Dos edificios comerciales de 50 pisos y 75,570 m² de edificación, de diferente estructuración mediante análisis híbrido de ciclo de vida, obteniendo los resultados siguientes:

Edificio con estructura de acero: 2,895 kg CO₂e/m².

Edificio con estructura de concreto: 2,501 kg CO₂e/m².

Edificio comercial de tres niveles para oficinas con una vida útil de 50 años. El área de edificación es de 11,600 m². La cimentación es una losa de concreto armado, la estructura es de acero con losas de concreto reforzado. Las

paredes externas son de concreto armado con paneles de aluminio. Las ventanas son de aluminio con doble acristalamiento.

Las emisiones de GEI por la edificación suman 22'879,000 kg CO₂e, por lo que las emisiones por metro cuadrado son de 1,972 kg CO₂e/m².

- Keoleian et al (2001) analizan dos tipos de viviendas unifamiliares, con un área de 228 m². La vivienda de referencia se denomina SH (Standard Home) y la vivienda propuesta se denomina EEH (Energy Efficient House).

Las emisiones de GEI durante todo el ciclo de vida fueron de:

SH: 1'010,000 kg CO₂e.

EEH: 370,000 kg CO₂e.

Las emisiones de GEI por metro cuadrado fueron de:

SH: 4,429 kg CO₂e.

EEH: 1,623 kg CO₂e.

Por otra parte los consumos energéticos de la etapa de edificación fueron de 9.41% para la vivienda SH y de 25.96% para la vivienda EEH. Suponiendo una proporcionalidad entre los consumos de energía y las emisiones de GEI se tendría que las emisiones por metro cuadrado de edificación fueron:

SH: 417 kg CO₂e/m².

EEH: 421 kg CO₂e/m².

- Borsani (2011) considera, en un estudio de los impactos ecológicos de los materiales que se utilizan en las edificaciones comunes, emisiones de GEI de 500 kg CO₂e/m² debidas a la edificación.

- Aranda (2008) en su tesis doctoral hace referencia al trabajo de Cuchí (2008) quien presenta los parámetros de emisiones de GEI de edificaciones mejoradas en España comparándolas con una vivienda de referencia. Considera las etapas de materiales, construcción, uso y derribo. Los valores obtenidos son:

Vivienda mejorada (sin garaje): 1,140 kg CO₂e/m².

Vivienda mejorada (con garaje): 1,360 kg CO₂e/m².

Vivienda de referencia (sin garaje): 2,040 kg CO₂e/m².

Vivienda de referencia (con garaje): 2,240 kg CO₂e/m².

- Hendrickson y Horvath (2000) analizaron las emisiones contaminantes y la demanda de recursos de los cuatro sectores más importantes de la construcción en los E.U.A. mediante el método Input-output, empleando el programa EIOLCA, concluyendo que las afectaciones ambientales que estos sectores provocan son menores que las que se esperarían por su participación en el producto interno bruto. Las emisiones de GEI calculadas para las construcciones nuevas residenciales fueron de 69,388 t CO₂e para una demanda del sector de 100 MD del año 1992. Debido a que sus parámetros los presenta en millones de dólares, no es posible comparar sus resultados con aquellos que los expresan en términos de emisiones por m².
- Ochoa et al (2002) analizaron la demanda de recursos, las emisiones de GEI, el consumo de electricidad, la generación de desechos y las emisiones al aire, de edificaciones típicas estadounidenses del año 1997, empleando el método Input-output mediante el programa EIOLCA. Consideraron las fases de

construcción, uso y demolición. La fase de uso resultó la predominante con el 92% de las emisiones de GEI totales, siendo la fase de demolición despreciable por sus efectos en cuanto a emisiones de GEI.

- Hernández-Sánchez et al (2010) calcularon, para el caso de Terrassa, una ciudad de tamaño medio con 211 000 habitantes y 80 000 viviendas, que las emisiones anuales son de 91,500 toneladas de CO₂e, lo que equivale a 1143.75 kg CO₂/vivienda/año; de acuerdo a estos mismo autores, el tamaño medio de las viviendas es de 88.1 m², por lo que las emisiones en términos unitarios de construcción son de 12.98 kg CO₂/m²/año, en estos cálculos consideran la operación de las viviendas.
- Werner T. (1996) realizó una comparación entre las emisiones de GEI en viviendas de estructura de acero y viviendas de estructura de concreto, determinó un factor de emisiones de GEI de 12.4 kg CO₂e/ft² para las viviendas con estructura de acero y de 16.4 kg CO₂e/ft² para las viviendas con estructura de concreto.
- Argüello y Cuchi (2007) realizaron un estudio comparativo de techumbres en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, determinando que de las diez opciones estudiadas solamente la opción de teja de barro con soportes ligeros logra disminuir considerablemente las emisiones de GEI respecto al elemento constructivo de referencia que fue una losa de concreto armado colada en el sitio.

3.2 Estimaciones de emisiones de GEI por producción de materiales.

Para la mayoría de los materiales de construcción se dispone de estudios acerca de las emisiones de GEI que su fabricación implica. Por otra parte una gran cantidad de información se encuentra disponible en bases de datos, algunas de las cuales son de libre acceso mientras que otras son administradas y vendidas por agencias. Las principales bases de datos existentes son:

- BEDEC. Esta importante base de datos fue elaborada por el Instituto de Tecnologías de la Construcción (ITEC) y provee a través de una página de internet de información de las emisiones de GEI, costos energéticos, residuos de obra, residuos de embalaje, precios y pliegos de condiciones. Estos datos se presentan para elementos constructivos de obra nueva y de mantenimiento en cada uno de los tipos: edificación, ingeniería civil, urbanización, rehabilitación y restauración, mantenimiento, seguridad y salud. Esta base dispone de más de 52,000 artículos comerciales provenientes de 91 empresas de la construcción.

Para los factores de emisiones de GEI de los elementos constructivos, toman datos de los pesos de los materiales y los factores de emisión por peso de estos. Los pesos son determinados de datos de los fabricantes, mientras que los factores de emisiones de GEI fueron obtenidos con el apoyo del Instituto Catalán de la Energía, de la Universidad Politécnica de Cataluña y del Centro Tecnológico de la Construcción, para algunos datos se apoyaron en otras bases de datos, especialmente en Ecoinvent 1.3. En estos cálculos consideraron las etapas de extracción, transporte del origen de la materia prima a la fábrica y el procesamiento en la misma. No se consideran las

emisiones por el consumo energético debido a la transformación de un material determinado en un producto final (por ejemplo para el acero no se consideran las emisiones para la fabricación de un tubo o una plancha determinados) ni el transporte final de la fábrica a la obra (ITEC-BEDEC, 2012). Se dispone de una versión de libre acceso y de licencias que permiten acceder a más información.

- EIO/LCA. Esta base de datos provee información de las emisiones de GEI, consumo energético e impacto económico de subsectores de la economía norteamericana. Las emisiones de GEI se obtienen en función de los costos de compra a la economía en el año 2002 empleando el método Input-Output. La información que se obtiene con esta base de datos es bastante precisa ya que emplea 490 subsectores económicos, sin embargo padece de los errores antes comentados del método Input-output, adicionalmente a lo cual se tiene que para evaluaciones en México se presumen diferencias en algunos procesos productivos y en los costos de los mismos. Para su aplicación se deben considerar dólares del año 2002 efectuando la transformación de acuerdo a la paridad peso-dólar de ese año y los costos de los materiales en pesos para ese mismo año.
- Guía Práctica para el Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Este documento fue elaborado por la Oficina Catalana de cambio Climático y presenta datos de algunos factores de emisiones de GEI, particularmente de combustibles, y la metodología para evaluar las emisiones de GEI de diversas actividades.

- Inventory of Carbon and Energy. Esta es una base de datos generada en la Universidad de Bath por Hammond y Jones (2008) en la que presentan factores de emisión de energía incorporada (que es relativamente fácil convertirla en emisiones de GEI) de alrededor de 1700 materiales agrupadas en 34 sectores. Se emplearon diversas fuentes libres en las que la definición más común de las fronteras fue bajo el criterio “de la cuna a la puerta” (cradle to gate). En el cálculo de algunos materiales, particularmente metales, toman en cuenta el efecto del reciclaje.
- BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability). En este programa de cómputo se implementa una técnica sistemática y racional para seleccionar materiales que de acuerdo a una técnica de optimización multicriterio toma en cuenta los costos y los impactos ambientales de los materiales de construcción, disponiendo en el programa de su propia base de datos que emplea un protocolo consistente con la norma ISO 14040 (Lippiatt, 2007). Este programa con su base de datos es de libre acceso.
- Ecoinvent. En esta base de datos se consignan datos de inventarios de ciclos de vida de más de 4000 procesos industriales, productos y servicios. Presenta información cuantitativa acerca de su incertidumbre a través de estimaciones probabilísticas y presenta valores máximos y mínimos. Para cada producto, proceso o servicio analizado la base de datos incluye información de:
 - Demanda acumulada de energía.
 - Demanda acumulada de exergía².
 - Caracterización orientada a los impactos.

² Se define como la parte de la energía que puede ser transformada en trabajo útil.

- Diseño ambiental de productos industriales.
- Ecoindicadores.
- Huella ecológica.
- Escasez ecológica.
- Potencial de daño ambiental.
- Estrategia de prioridad ambiental.
- Cambio Climático.
- ReCipe³.

A esta base de datos se puede acceder por internet mediante el pago de una cuota de 2,500 Euros más una cuota anual de actualización.

- La EPA (Environmental Protection Agency) de los EUA presenta en su Reporte AP-42, datos de emisiones contaminantes de diversos materiales. El acceso a este reporte es libre y se puede consultar por internet.
- El programa GEI MEXICO (www.geimexico.org) recopila los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero de industrias mexicanas. En sus reportes las empresas siguen una metodología definida y establecen los alcances de sus análisis, siendo común contar con evaluaciones de emisiones de GEI para los alcances 1 y 2. A menudo no es posible establecer factores de emisiones de GEI a partir de los reportes de inventario consignados en este programa por la falta de información de producción, por lo que estos datos deben ser complementados con los de otras fuentes para poder efectuar los cálculos de los factores de emisiones.

³ Es una herramienta que permite sintetizar los resultados de un inventario de ciclo de vida mediante el uso de indicadores.

Además de las bases de datos, se cuenta con una gran cantidad de información científica acerca de las emisiones de GEI debidas a los procesos de fabricación de materiales en artículos y libros científicos. Los factores de emisiones de GEI para los materiales más impactantes son:

- Gasolina:
 - López et al, (2008) calcularon emisiones de 10.961 gCO₂e/MJ, por la producción de las gasolinas, considerando 3.4 gCO₂e/MJ de petróleo crudo durante las actividades de extracción. Sumando directamente estas cantidades nos daría un factor de emisiones de CO₂e de 14.361 gCO₂e/MJ por las actividades de extracción y procesamiento de la gasolina.
 - La EPA considera un factor de emisiones directas por combustión de 66.3 g CO₂/MJ que equivale a 2.34 kgCO₂e/l.
 - Macedo (2007), en un estudio acerca de los biocombustibles en México, considera que las emisiones totales (Directas e indirectas) de la gasolina son de 2.80 kgCO₂e/l.
- Diesel:
 - La EPA considera un factor de emisiones directas por combustión de 70.61 g CO₂/MJ equivalente a 2.644 kg CO₂/l.
 - Macedo (2007) considera un factor de emisiones de GEI por la fabricación y quema del diesel en vehículos de 0.168 kg CO₂e/km.
- Combustóleo:

- El factor de emisión directa de CO₂e del combustóleo según Vijay et al (2004) es de 3.04 kg CO₂e/lit.
- Haro (2010) considera un factor de emisiones total de 2.885 kg CO₂e/lit.
- La EPA reporta un factor de emisión directo de 24.7 lbs/10³gal que equivale a 2.9597 kg CO₂e/lit.
- Gas natural:
 - Haro (2010) considera el factor de emisión de CO₂e por el consumo de gas natural de 54,300 kg CO₂e/TJ, por lo que considerando el poder calorífico neto de 48.0 TJ/Gg y una densidad de 0.00074 Ton/m³, se obtiene un factor de emisiones de GEI de 1.9287 kg CO₂e/m³ de gas natural.
 - El Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España en la información que aporta a través de la página de internet de su Secretaría de Estado de Energía reporta un valor aproximado de emisiones de GEI por combustión de gas natural de 55 kg CO₂e/GJ, equivalentes a 0.055 kg CO₂e/MJ. El poder calorífico neto del gas natural es de 48.0 TJ/Gg y varía entre 46.5 y 50.4 para un intervalo de confianza del 95%. Considerando este valor de poder calorífico, que es equivalente a 48.0 MJ/kg, tendríamos un factor de emisión por combustión del gas natural de 2.64 kg CO₂e/kg, considerando la densidad del gas natural, tendremos finalmente un factor de emisiones de GEI de 1.9536 kg CO₂e/m³.
 - Según el IPCC (2006) el factor de emisión de GEI del gas natural es de 56,100 kg/TJ. Siendo según esta misma fuente el poder calorífico neto

del gas natural de 48.0 MJ/kg, por lo que el factor de emisiones de GEI es de 2.6928 kg CO₂e/kg. Si la densidad del gas natural se considera de 0.74 kg/m³, finalmente se tendría un factor de emisión de 1.9927 kg CO₂e/m³.

- Okamura et al (2007) estiman, para una ciudad japonesa, que las emisiones de GEI por la producción y consumo de gas natural son:

Por producción = 0.81 g-CO₂e/MJ

Por transporte marítimo = 1.97 g-CO₂e/MJ

Por equipos = 0.04 g-CO₂e/MJ

Considerando que el gas natural tiene un poder calorífico de aproximadamente 48 MJ/m³, tendríamos que las emisiones de GEI por m³ de gas natural serían:

Por producción = 0.03888 kg CO₂e/m³

Por transporte marítimo = 0.09456 kg CO₂e/m³

Por equipos = 0.00192 kg CO₂e/m³

- Johnson et al (2009) en el estudio sobre la disminución de emisiones de carbono en México (MEDEC) consideran emisiones totales del gas natural de 0.0696 t CO₂e/GJ, equivalente a 0.0696 kg CO₂e/MJ. Tomando un poder calorífico neto del gas natural de 48.0 MJ/kg, tendremos un factor de emisiones totales de 3.3408 kg CO₂e/kg y

finalmente considerando una densidad del gas natural de 0.74 kg/m³,
tenemos:

$$\begin{aligned}\text{Factor de emisiones} &= 3.3408 \text{ kg CO}_2\text{e/kg} * 0.74 \text{ kg/m}^3 \\ &= 2.4722 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3\end{aligned}$$

Las emisiones downstream consideradas son de 0.0561 t CO₂e/GJ, siendo las emisiones upstream de 0.0135 t CO₂e/GJ. Esto equivale a considerar un factor de emisiones indirectas del 19.4%.

- En un estudio sobre las emisiones de GEI del gas natural extraído de depósitos de esquisto en tierra firme de los Estados Unidos, Santoro et al (2011) concluyen que las emisiones indirectas del proceso del gas natural se estiman en 1.17 a 1.69 g C MJ⁻¹, que equivalen a un rango de 4.29 a 6.20 g CO₂/MJ. Tomando el valor promedio de estos valores y considerando un poder calorífico neto del gas natural de 48 MJ/kg el factor de emisiones de GEI indirectas sería:

$$\begin{aligned}\text{Factor de emisiones indirectas} &= 5.245 \text{ g CO}_2\text{/MJ} * 48 \text{ MJ/kg} \\ &= 251.76 \text{ g CO}_2\text{/kg}\end{aligned}$$

Tomando la densidad del gas natural como 0.74 kg /m³, se tendría:

$$\begin{aligned}\text{Factor de emisiones indirectas} &= 0.74 \text{ kg /m}^3 * 251.76 \text{ g CO}_2\text{/kg} = 186.3 \\ &\text{g CO}_2\text{/m}^3\end{aligned}$$

Las emisiones por pérdidas de metano durante el proceso se encuentran según este autor en el rango de 21.3 a 48.6 g CO₂e/MJ, equivalentes a 1241 g CO₂e/m³.

Las emisiones indirectas de GEI según estos autores serían de: 1.428 kg CO₂e/m³, por lo que el factor de emisiones totales sería:

Factor de emisiones totales de GEI = 1.428 + 1.9927 = 3.4207 kg CO₂e/m³.

- o De acuerdo con el programa de cómputo EIOLCA,

Extracción de petróleo y gas: 1990 t CO₂e/MD

Distribución de gas natural: 2430 t CO₂e/MD

Precio de gas exportado en 2002 = 3.32 dólares por mil pies cúbicos

Precio de gas importado en 2002 = 3.13 dólares por mil pies cúbicos

El costo de los trabajos de exploración del gas natural representan alrededor del 7.0% de los ingresos de las empresas dedicadas a la extracción y distribución del gas natural. La estructura de los costos del gas natural se pueden aproximar mediante los siguientes porcentajes de los ingresos que las industrias de este combustible tuvieron durante el 2011:(Oil Drilling & Gas Extraction in the US March 2011)

Utilidades: 48%

Depreciación:	25%
Salarios:	4.0%
Compras:	7.0%
Otros:	16%

Considerando que el costo real de la extracción del gas natural es del 52% del costo de venta, tendremos que el costo de producción en los Estados Unidos en el año 2002 fue de $\$3.32 * 0.52 = \1.73 dólares por cada mil pies cúbicos (mpc).

Las emisiones de GEI de la industria norteamericana del gas natural, de acuerdo al método Input-Output y con base en la matriz de la economía norteamericana del año 2002, serían las siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Emisiones de GEI} &= \$1.73/\text{mpc} * 10^{-6} \text{ MD} * 1990 \text{ t CO}_2\text{e/MD} \\ &= 3.4427 * 10^{-3} \text{ t CO}_2\text{e}. \text{ Esto equivale a } 3.4427 \text{ kg CO}_2\text{e/mpc}. \end{aligned}$$

Mil pies cúbicos son equivalentes a 28.32 m³, por lo que las emisiones derivadas de las actividades de extracción del gas natural serían de: 0.1216 kg CO₂e/m³.

- Energía eléctrica:
 - De acuerdo al Programa GEIMexico, el factor de emisiones de GEI para la energía eléctrica en México es de 0.4946 kg CO₂e/kWh.

- De acuerdo al modelo Input-Output de la economía mexicana del año 2003, tomando los precios de la energía eléctrica para ese año reportados por la SENER⁴ el factor de emisiones de GEI era de 0.5186 kg CO₂e/kWh.
- Aceros:
 - La empresa Ternium México, reporta para el 2010 un total de emisiones de GEI de 4'621,333 t CO₂e, correspondientes a un factor de emisiones de GEI de 0.96 t CO₂e/t AL. En sus cálculos la empresa considera al Alcance 1 (combustión de combustible fósiles), el Alcance 2 (Emisiones indirectas por el consumo de energía eléctrica) y el Alcance 3 (por consumo de oxígeno, nitrógeno y otros insumos adquiridos de alto volumen). No considera las emisiones por extracción y transporte del mineral de hierro.
 - Altos Hornos de México reportó para el año 2009 emisiones de GEI totales (Alcances 1 y 2) por 6.43 Mt CO₂e, correspondientes a una producción de acero líquido de 2.99 Mt, por lo que el factor de emisiones en ese año fue de 2.15 t CO₂e/t acero líquido (AHMSA, 2010).
 - De acuerdo con Hernández (2009) las emisiones de GEI por la producción de acero en México dependen del proceso de fabricación del acero, siendo la producción mediante altos hornos (BF) y hornos básicos de oxígeno (BOF) la que más contribuye al calentamiento global ya que, según este autor, tiene un factor de emisiones de 3.0803

⁴ Consultado en <http://www.sener.gob.mx>

t CO₂e/t acero, mientras que la producción de acero mediante la reducción directa del acero (DRI) o mediante hornos de arco eléctrico (EAF) alcanza solamente 0.92962 t CO₂e/t acero. Es de hacer notar que estos cálculos se basan en información de procesos con datos que van desde 1996 hasta 2004, por lo que algunos procesos que han sido mejorados posteriormente no fueron tomados en cuenta. Si se considera que el 36.6% de la producción nacional se fabrica con el proceso EAF y el resto con el proceso BOF, tendríamos que el factor global de emisiones sería igual a $0.366 * 0.92962 + 3.0803 * 0.634 = 2.293$ t CO₂e/t acero.

- El Instituto Nacional de Ecología considera un factor de emisiones de GEI para la producción del acero de 1.6 t CO₂e/t acero, siendo 1998 el año base para sus cálculos⁵.
- Para el caso de la República Popular de China, el factor de emisiones de GEI en promedio del año 1995 era de 0.87 tC/t acero, que corresponde a 3.19 t CO₂e/t acero (Price et al, 2001). De acuerdo a este mismo reporte la oportunidad de disminución de las emisiones de GEI eran del 45%, por lo que en el mejor de los casos esta industria china podía llegar a obtener un factor de emisiones de 1.7545 t CO₂e/t acero.
- El promedio mundial de emisiones de GEI por la producción unitaria de acero se estimó para el año 1996 en 1.97 tCO₂e/t acero (Sandberg et al, 2001). Estos mismos autores reportan que la producción de acero

⁵ Consultado en <http://www.ine.gob.mx/cpcc-lineas/597-cpcc-inventario>.

en Suecia, tiene factores de emisión mucho menores a los factores globales, debido principalmente a dos factores: El uso de minerales de hierro con alto contenido de hierro (magnetita) y en segundo término a que la generación de la energía eléctrica es prácticamente “cero emisiones” ya que el 50% es producida por hidroeléctricas y el otro 50% es producido por nucleoeeléctricas. Los factores de emisión reportados para la producción de acero sueca son: Para producción en altos hornos tipo BOF (Basic Oxygen Furnace) de 1.47 t CO₂e/t acero, mientras que para la producción de acero en hornos de arco eléctrico (EAF) el factor de emisiones de GEI es de 0.3 a 0.4 t CO₂e/t acero.

- Para el caso de la industria tailandesa de producción de acero, Tongpool et al (2010) reportan factores de emisión de GEI que van de 1 t CO₂e/t acero para los aceros planos, hasta 1.5 t CO₂e/t acero para el acero rolado en frío, considerando que el acero rolado en caliente (como es el caso de las varillas) tiene un factor de emisiones de 1.2 t CO₂e/t acero.
- En los Estados Unidos, las emisiones por cada millón de dólares de acero que se comercializa, calculado con el método Input-Output y empleando el programa de cómputo EIOLCA, es de 3660 t CO₂e/MD. Este programa considera datos de los sectores de la industria norteamericana del año 2002. El precio del acero en el año 2002 en Estados Unidos era de \$250/t, por lo que el factor de emisiones, de acuerdo a este método es de:

$$3660 \text{ t CO}_2\text{e/MD} * 0.000250 \text{ MD/t acero} = 0.915 \text{ t CO}_2\text{e/t acero}.$$

Este valor considera las emisiones de todos los sectores que se involucran en la producción del acero, sin embargo padece el defecto de ser sensible a los cambios de precios del acero, lo que se puede deber a factores ajenos al proceso productivo. Por otra parte involucra todos los tipos de acero y todos los modos de producción en un solo factor de emisiones.

- En España el factor de emisiones de GEI considerado por el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITEC) es de 2.819 kg CO₂e/kg acero de refuerzo puesto en la obra⁶.
- Cemento.
 - Hanle et al (2004) reportan un factor de emisiones promedio en los EUA de 0.97 kg CO₂e/kg de cemento, con variaciones entre los estados que van desde 1.41 kg CO₂e/kg de cemento para Kansas hasta 0.72 kg CO₂e/kg de cemento para Michigan.
 - El factor de emisión para el cemento en los E.U. considerado en el programa EIOLCA (Método Input-Output) es de 1.047 kg CO₂e /kg cemento (Masanet et al, 2005).
 - En un estudio de las emisiones de gases contaminantes por la producción de cemento en Europa, Cardim (2001) calculó un factor de emisiones de CO₂e de 0.97 kg CO₂e/kg de cemento. En este estudio el autor considera un cemento sin adiciones (con el 100% de clinker) y emplea el Análisis del Ciclo de Vida del cemento mediante el análisis

⁶ Consultado en <http://www.itec.es/noumetaBase2.e/Presentacio.aspx?page=bancbedec>. el 14 de febrero de 2012.

del proceso, sin considerar en las emisiones aquellas emisiones de GEI provocadas por las depreciaciones de los equipos e instalaciones, ni ninguna otra de los demás sectores de la economía.

- Arena de río.
 - El Instituto de las Tecnologías de la Construcción (ITEC) en su base de datos BEDEC considera para los áridos (grava y arena) un factor de emisiones de GEI de 8 kg CO₂e/t árido. El peso volumétrico de la arena seca es de aproximadamente 1600 kg/m³, por lo que en términos volumétricos, el factor de emisión de la arena según el ITEC es de 12.8 kg CO₂e/m³.
- Concretos:
 - El Instituto de Tecnologías de la Construcción (ITEC) en su base de datos BEDEC reporta para el concreto de f'c = 250 kg/cm² emisiones de GEI de 266.56 kg CO₂e/m³.
 - Correa et al (2003) Realizaron el análisis de ciclo de vida de pavimentos de bloques de concreto de 6 cm de espesor con un contenido de cemento de 430 kg/m³, en ciudades de la región árida de Argentina. Determinaron un factor de emisiones de 24.73 kg CO₂e/m² de pavimento. Esto equivale a 412.17 kg CO₂e/m³ de concreto.
 - Lemay (2011) considera de 100 a 300 kg CO₂e/m³ de concreto dependiendo del contenido de cemento, que puede variar entre el 5% y el 13%.

- Sand et al (2001) consideran emisiones de GEI por la producción del concreto de entre 100 a 200 kg CO₂e/t concreto. Esto equivale a emisiones de GEI de entre 220 a 440 kg CO₂e/m³ de concreto.
- Nisbet et al (2002) analizaron las emisiones de GEI durante el proceso de fabricación del concreto, determinando emisiones de:
 - 329 kg CO₂e/m³ para concreto de f'c = 350 kg/cm².
 - 279 kg CO₂e/m³ para concreto de f'c = 300 kg/cm².
 - 228 kg CO₂e/m³ para concreto de f'c = 200 kg/cm².
- Bloques de concreto.
 - Según la base de datos BEDEC, las emisiones de GEI por m² de muro de bloques huecos de 13 cm de espesor (incluyendo el mortero para asentar las piezas) es de 35.44 kg CO₂e/m², teniendo un peso de 161.14 kg, por lo que las emisiones por kg de muro serían de 0.2199 kg CO₂e/kg de muro.
 - De acuerdo a la base de datos de coeficientes de energía del Centre for Building Performance Research de Nueva Zelanda (Alcorn y Wood, 1998) un kg de bloque de mortero de cemento contiene 1.4 MJ de energía.
- Madera de escuadría de pino.
 - Ochsendor et al (2011) analizaron las emisiones de GEI debidas a la edificación empleando el método de ACV en los EUA. Para la madera de pino consideran emisiones de están en el rango de 0.282 kg CO₂e/kg a 0.169 kg CO₂e/kg. Considerando que un pie-tablón tiene un volumen de 0.0023597 m³ y una densidad de 600 kg/m³, las emisiones

en términos de volumen sería de 135.3 kg CO₂e/m³ o bien de 0.3193 kg CO₂e/PT.

- Cimbraplay.
 - En el estudio realizado por Wilson y Sakimoto (2005) se llevó a cabo un detallado inventario de ciclo de vida para la manufactura de triplay, recabando información de las zonas Pacífico Noroeste y Sureste de los Estados Unidos. En el estudio se toman en cuenta los impactos debidos a la manufactura, producción, entrega, combustión de combustibles fósiles, producción de electricidad y manufactura de la resina. Se excluyeron los impactos debidos a la actividad forestal, corte de los árboles, transporte de los troncos, transporte de la resina, compra de chapas y el consumo de productos de madera como combustible. Para producir un metro cúbico de triplay se requieren de 2.1 m³ de madera en troncos.

En el estudio se considera que la combustión de biomasa tiene un impacto neutral en las emisiones de GEI. Las emisiones de GEI reportadas en este estudio son las siguientes:

CO₂ (biomasa): 217 kg/m³.

CO₂ (fósil): 106 kg/m³.

CH₄: 0.253 kg/m³.

NO_x: 0.784 kg/m³.

Considerando los potenciales de calentamiento global de estos gases se tiene que las emisiones de GEI en términos de CO₂ equivalente son de 562 kg CO₂e/m³, esto tomando en cuenta la combustión de la

biomasa, si esta es considerada neutra, las emisiones serían de 456 kg/m³. En particular resulta relevante en este estudio que no se toman en cuenta las emisiones de GEI por cambios en el uso del suelo, que si bien es posible que sean mínimas o nulas en los EUA, en México distan mucho de serlo.

- En un estudio similar al anterior llevado a cabo en la misma zona por Puettmann y Wilson (2005) reportan 375 kg CO₂e/m³ de triplay considerando las emisiones por combustión de biomasa y de 229 kg CO₂e/m³ sin considerar las emisiones de GEI por la combustión de la biomasa.
- El ITEC considera en su base de datos BEDEC un factor de emisiones de GEI de 6.65 kg CO₂e/kg de madera laminada (triplay), por lo que si se considera un peso volumétrico del triplay de 500 kg/m³, tendremos un factor de emisiones de 3,326 kg CO₂e/m³ triplay.
- Aluminio.
 - De acuerdo con el Green Design Institute el refinamiento y producción primaria del aluminio emiten 3,340 tCO₂e/MD 2002, con una demanda total de energía de 49 TJ/MD. Para el caso de la fundición secundaria y aleaciones del aluminio se tiene que las emisiones de GEI son de 3,490 tCO₂e/MD. Para el caso de la manufactura de productos de aluminio con aluminio comprado las emisiones son de 1,560 tCO₂e/MD. El precio promedio del aluminio en la Estados Unidos en 2002 (dólares americanos) se estima en \$4.38 dólares por kg, por lo que con un millón de dólares se podían adquirir 228.3 t de aluminio. Esto implica

14.63 t CO₂e/t aluminio en refinación y producción primaria, así como un factor de emisiones por producción secundaria y de aleaciones de aluminio de 15.29 t CO₂e/t aluminio. En el caso de la producción de aluminio con aluminio comprado (chatarra) el factor de emisiones era de 6.83 t CO₂e/t aluminio.

- Los factores de emisión consignados en la base de datos BEDEC dependen del tipo de aluminio:
 - Aluminio simple. Factor de emisiones = 9.265 kg CO₂e/kg aluminio.
 - Aluminio lacado. Factor de emisiones = 32.036 kg CO₂e/kg aluminio.
 - Aluminio anodizado. Factor de emisiones = 33.369 kg CO₂e/kg aluminio.
- Tan RB y Khoo HH (2005) calcularon las emisiones de gases contaminantes a lo largo del ciclo de vida del aluminio, bajo el criterio Cradle to Gate (*de la cuna a la puerta*), para el caso australiano. Se estimaron los factores de emisión correspondientes a cuatro escenarios, siendo el total de emisiones de GEI para el caso analizado (sin implementar mejoras) de $1.83 \cdot 10^7$ g CO₂e por tonelada de aluminio, lo que equivale a un factor de emisiones de GEI de 18.3 kg CO₂e/kg aluminio.
- Norgate et al (2006) realizaron análisis de ciclos de vida de diversos metales en Australia, bajo el criterio “cradle to gate” analizando los

procesos comunes así como procesos basados en nuevas tecnologías.

Para el caso del aluminio determinaron el siguiente factor de emisión:

Factor de emisión = 22.4 kg CO₂e/kg Aluminio.

Para sus cálculos consideraron que del mineral de aluminio (bauxita) se obtiene aluminio refinado a través del proceso Bayer, obteniéndose aluminio casi puro a través de un proceso electrolítico llamado Proceso Hall-Heroult.

- La EPA considera que las emisiones de GEI por la fabricación del aluminio dependen del proceso seguido, considerando para el proceso Soderberg 3,670 lb CO₂/t Al producido, mientras que para el proceso Prebake considera 3080 lb CO₂e/t Al producido. Adicionalmente considera que se emiten CF₄ y C₂F₆, por lo que un factor total promedio de emisiones por producción del aluminio (sin incluir la minería de la bauxita, ni transporte durante los procesos y al usuario final, ni por uso de energía) = 6.8515 kg CO₂e/kg Al.
- Martchek (2006) considera el efecto del reciclaje en la reducción de las emisiones obteniendo un factor de emisión de 6.8 kg CO₂e/kg aluminio. La proporción entre el aluminio primario y el total es de 48.8% siendo la diferencia aluminio reciclado.
- Cobre.
 - El Instituto Europeo del Cobre ha publicado informes de análisis de ciclo de vida de diversos productos de cobre, obteniendo factores de emisiones de GEI que dependen del tipo de producto. Para las láminas de 0.6 mm de espesor consideran 1.981 kg CO₂e/kg Cu, para los tubos

de 15 mm de diámetro y un mm de espesor consideran 2.385 kg CO₂e/kg Cu y para alambres de 1 mm² de sección un factor de 4.238 kg CO₂e/kg Cu. En estos ACV se consideraron las emisiones obtenidas bajo el criterio “de la cuna a la puerta” considerando los efectos del reciclaje en la obtención de los nuevos productos.

- La base de datos BEDEC considera para el tubo de cobre R250 semiduro un factor de emisiones de 14.76 kg CO₂e/kg Cu, mientras que para el tubo de cobre R220 recocido considera 14.81 kg CO₂e/kg Cu.
- Deduciendo las emisiones de GEI de los resultados del EIO/LCA para un millón de dólares del 2002 con los precios de ese año, el factor de emisiones sería de 1.972 kg CO₂e/kg Cu.
- Minera México reportó⁷ emisiones de GEI para el año 2010 de 1'192,375.33 tCO₂e. Por otra parte la producción de cobre de esta empresa (Grupo México, 2011) para el año 2010 fue de 701'708,000 kg de cobre, por lo que el factor de emisiones se calcula en 1.699 kg CO₂e/kg Cu.
- Ayres et al (2002) Para la obtención de cobre procedente de concentrados y chatarra el factor de emisión de GEI reportado es de 2.553 kg CO₂e/kg de cobre. Para obtener el mineral concentrado de cobre se emiten 17.89 kg CO₂e/kg concentrado de cobre, considerando que la minería se efectúa en minas a cielo abierto y los minerales tienen concentraciones promedio. Sumando las emisiones correspondientes a la obtención del cobre primario tendremos:

⁷ www.geimexico.org

Extracción y concentración del cobre: 17.890 kg CO₂e/kg Cu.

Fundición: 2.553 kg CO₂e/kg Cu.

Factor de emisiones total: 20.443 kg CO₂e/kg Cu.

- Policloruro de Vinilo (PVC).
 - Venkatesh et al (2009) estudiaron la red de drenaje de la ciudad de Oslo mediante un análisis de flujo de materiales combinado con un análisis de ciclo de vida. En este trabajo consideran que el factor de emisión de GEI por la producción de tubos de PVC es de 2.36 kg CO₂e/kg de tubo PVC.
 - El Instituto de Tecnologías de la Construcción reporta en su base de datos BEDEC un factor de emisiones de GEI por la producción de tubos de PVC de 10.3 kg CO₂e/kg de tubo de PVC.
 - De acuerdo a datos proporcionados por los productores⁸ el factor de emisiones de GEI del PVC es de 1.8 kg CO₂e/kg de PVC.
 - En el análisis de ciclo de vida de los plásticos llevado a cabo por Koo C H (2006) calcula los factores de emisiones de GEI para diferentes plásticos, según su disposición final. Para el caso del PVC este autor determinó que para el caso del PVC que se recicla el factor de emisiones de GEI es de 3.091 kg CO₂e/kg PVC y para el caso de incineración de los residuos de PVC el factor alcanza 3.176 kg CO₂e/kg PVC.
 - Simonson et al (2001) en un estudio de los cables de cobre recubiertos de PVC determinaron un factor de emisiones de GEI de 5.64 kg CO₂e/kg PVC, considerando que la mitad de los cables son quemados, durante o al final de su ciclo de vida.

⁸ <http://www.pvc.org>

- La agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency, EPA) desarrolló una hoja de cálculo (Waste Reduction Model, WARM) con un modelo de estimación de la reducción de gases de efecto invernadero por la reducción de residuos. En su base de datos considera que una tonelada de reducción en el consumo y disposición de PVC origina una disminución de 1.98 t CO₂e, por lo que puede considerarse que este es el factor de emisiones de GEI correspondiente al PVC que esta agencia considera como adecuado.
- Hammond G y Jones C (2008), en un extenso proyecto de inventario de energía y emisiones de GEI llevado a cabo para la Universidad de Bath, refieren que el factor de emisiones de GEI para la tubería de PVC es de 2.5 kg CO₂e/kg PVC, variando este factor en otras aplicaciones desde 2.2 kg CO₂e/kg PVC a 2.6 kg CO₂e/kg PVC. En este estudio los autores consideran las emisiones que ocurren desde la extracción de los materiales hasta el producto terminado, sin incluir aquellas emisiones derivadas del transporte al sitio de uso, al uso mismo y a la disposición final.
- La herramienta BEES (Building for Environmental and Economical Sustainability) desarrollada por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST por sus siglas en inglés) tiene en su base de datos factores de emisión para tubos de PVC basados en un estudio llevado a cabo por la empresa Franklin Associates (2011); en este estudio analizaron tres viviendas con diferentes tipos de instalaciones hidrosanitarias determinando las emisiones de GEI por estas instalaciones para cada

vivienda. Las emisiones de GEI por la instalación hidrosanitaria de PVC rígido para una vivienda de 127 m² fue de 248.11 kg CO₂e, siendo el peso de este PVC de 84.19 kg, por lo que el factor de emisiones correspondiente sería de 2.95 kg CO₂e/kg PVC. En estas emisiones no se consideran los efectos de la posible combustión del PVC durante su vida útil o en su disposición final.

- De acuerdo a la base de datos Athena el factor de emisiones de GEI para un caso genérico de membranas, es de 2.77 kg CO₂e/kg PVC⁹.
- Las emisiones por combustión del PVC fueron reportadas por Robbins et al (2010) entre 0.3 kg CO₂e/kg PVC y 1.1 kg CO₂e/kg PVC, recomendando un valor de 0.46 kg CO₂e/kg PVC.
- Las emisiones por disposición en un relleno sanitario (sin incinerar) y por reciclaje del PVC fueron estudiadas por Craighill y Powell (1996), obteniendo valores de 0.15632 kg CO₂e/kg PVC y 0.05386 kg CO₂e/kg PVC para un caso de estudio en el que la distancia de recolección era de 13.9 km y la distancia a la planta de reciclaje era de 29 km. Las emisiones por recolección se calcularon en 0.02684 kg CO₂e/kg de RSD. En este estudio no hace mención de las emisiones derivadas de los combustibles fósiles empleados en el reciclaje.
- Poliestireno expandido (EPS).
 - En un estudio de efectos ambientales de los empaques plásticos, Ross y Evans (2003) determinaron un factor de emisión para el EPS de

⁹ http://www.buildingmaterials.umn.edu/07530_athena.html

7.36 kg CO₂e/kg de EPS. En este estudio consideran las emisiones de GEI por los insumos directos en forma de carbón, petróleo y gas.

- En un análisis comparativo de diferentes materiales de aislamiento térmico, DeBenedetti et al (2007) calcularon los impactos ambientales y comportamientos térmicos de algunos materiales de construcción empleados como aislantes, determinado un factor de emisiones de GEI para el EPS de 5.7 kg CO₂e/kg EPS.
- Horvath y Chester (2009) elaboraron un estudio de las emisiones de GEI de cuatro tipos de contenedores de alimentos, determinando para los contenedores fabricados de EPS un factor de emisiones que varía entre 2.82 kg CO₂e/kg EPS hasta 3.29 kg CO₂e/kg EPS.
- De acuerdo a la base de datos BEDEC el factor de emisiones del EPS es de 17.27 kg CO₂e/kg EPS.
- Zelazna y Pawlowski (2011) en un estudio comparativo de materiales como aislantes térmicos para la construcción sustentable, consideraron para el EPS un factor de emisiones de 3.82 kg CO₂e/kg EPS, empleando la base de datos Ecoinvent.
- Kumar et al (2012) estudiaron diversas opciones de materiales de construcción que pueden ser empleados para la “edificación verde”, considerando su costo, la energía incorporada, las emisiones de GEI, propiedades térmicas y densidades. En este estudio consideraron para el EPS un factor de emisiones de GEI de 2.55 kg CO₂e/kg EPS.
- Empleando el método Input-Output con la herramienta EIO LCA basada en la matriz de insumos-productos de la economía norteamericana del

año 2002, se obtiene un factor de emisiones de GEI de 1,250 t CO₂e por cada millón de dólares del 2002. El precio del EPS en el año 2010 fue de \$827.13 pesos, por lo que considerando que un dólar americano del 2002 equivale a 15.28 pesos mexicanos del 2010, se obtiene un costo del EPS de \$54.13 dólares americanos del 2002. Con este precio se podían comprar, con un millón de dólares, 18,474 m³ de EPS. El factor de emisiones de GEI será igual a 67.66 kg CO₂e/m³.

- Pisos y recubrimientos de cerámica.
 - Según BEES las emisiones de GEI correspondientes al piso cerámico denominado “Generic ceramic tile w/recycled glass” son de 5.649 kg CO₂e/ft² equivalentes a 60.81 kg CO₂e/m². Estas emisiones consideran el mortero de instalación (1.3 cm de espesor) y las losetas de arcilla de 15 cm x 15 cm x 1.3 cm. Cada loseta tiene un peso de 0.6324 kg, por lo que el peso de las losetas por m² es de 28.11 kg. Los materiales que forman esta loseta tienen un 75% de vidrio reciclado y el 25% restante es arcilla. Para la fabricación de estas losetas se emplean 4.19 MJ/kg, considerando los siguientes porcentajes de combustibles empleados:

Carbón:	0.402 MJ/kg (9.6%)
Gas natural:	3.013 MJ/kg (71.9%)
Combustóleo:	0.327 MJ/kg (7.8%)
Madera:	0.448 MJ/kg (10.8%)

- Hammond y Jones (2008) consideran un factor general de emisiones de GEI para los productos cerámicos simplemente horneados de 0.24 kg CO₂e/kg, mientras que para los pisos de cerámica consideran 0.48 kg CO₂e/kg.
- La Base de datos BEDEC considera para las baldosas de gres porcelánico un factor de emisiones de GEI de 1.02 kg CO₂e/kg de baldosa. Para el caso de las baldosas de gres extruido esmaltado el factor de emisiones de GEI es de 0.82 kg CO₂e/kg de baldosa. Para el caso de baldosas de cerámica común, el factor de emisiones es de 0.21 kg CO₂e/kg de baldosa.
- Diaz Rubio (2011) en su trabajo final de Master calculó las emisiones de CO₂ de diversos productos cerámicos en España, obteniendo factores de emisión de entre 0.1158 kg CO₂e/kg a 0.1734 kg CO₂e/kg. En estas emisiones no considera las correspondientes al transporte y a la descarbonatación de la arcilla. Para el caso de la descarbonatación el autor considera que la arcilla contiene, en promedio, 7% de carbonatos, por lo que las emisiones correspondientes son de 0.0308 kg CO₂e/kg. El promedio de estas emisiones, considerando la descarbonatación y sin sin considerar el transporte serían de 0.212 kg CO₂e/kg.
- Werner et al (2006) consideran para las baldosas cerámicas esmaltadas un factor de emisiones de GEI igual a 23.88 kg CO₂e/m².
- Tikul y Srichandr (2010) determinaron un factor de emisión de GEI de 0.373 kg CO₂e/kg de cerámica, empleando la metodología EDIP

(Environmental Design of Industry Products) al caso de la producción en Tailandia.

- La USEPA (United States Environmental Protection Agency) determinó (1996), como factor promedio de emisiones de GEI para los productos cerámicos (incluyendo los pisos) 0.300 kg CO₂e/kg. Para este factor promedio de emisiones consideró que se empleaban hornos con gas natural como combustible.
- En los Estados Unidos, el Instituto de Estándares y Tecnologías (NIST) desarrolló una Guía de Recursos Ambientales en la que compiló los datos de impactos ambientales de diversos materiales, incluyendo la cerámica, para la cual determinó un factor de emisiones de GEI de 0.806 kg CO₂e/kg de cerámica. De acuerdo a esta guía, este factor de emisiones es el que emplea el BEES.
- La base de datos del SimaPro considera un factor de emisiones de 0.494 kg CO₂e/kg de cerámica.
- Vidrios planos:
 - Robinson-Gayle (2003) en su tesis doctoral determinó un factor de emisiones de GEI para la fabricación de vidrio flotado en la planta de Pilkington de 1059 kg CO₂e/kg de vidrio flotado. Este factor tomó en cuenta los siguientes pasos:
 - Extracción de materias primas.
 - Transporte de estos materiales a la planta.
 - Construcción de la planta.

- Procesamiento de la materia prima.
- Energía consumida por la planta.
- Uso de co-productos de otros procesos y la producción de desperdicios.
- Preparación del vidrio para su venta.

Como comparativa este autor cita el factor obtenido por el grupo consultor BRE (iniciales del grupo llamado inicialmente Building Research Station, en Reino Unido) para el cristal flotado. Este factor es de 1,100 kg CO₂e/kg de vidrio flotado.

- En la base de datos BEDEC del Instituto de Tecnologías de la Construcción (ITEC) se considera un factor de emisiones de GEI para el vidrio plano transparente de 0.94 kg CO₂e/kg de vidrio.
- De acuerdo a un extenso estudio llevado a cabo en Europa por la asociación comercial Glass for Europe, empleando un análisis de ciclo de vida “de la cuna a la puerta”, el factor de emisiones de GEI es de 1.25 ± 0.03 kg CO₂e/kg de vidrio flotado.
- La herramienta EIO LCA considera para un millón de dólares del año 2002, emisiones por la fabricación de vidrio flotado de 2,050 tCO₂e. El costo del vidrio flotado en el año 2002 en los Estados Unidos era de 0.3113 dólares del año 2002 por kg de vidrio flotado transparente¹⁰. Por lo que con un millón de dólares se podían adquirir 3,212.77 toneladas de vidrio flotado transparente y el factor de emisiones correspondiente sería de 0.638 kg CO₂e/kg de vidrio flotado.

¹⁰ http://data.un.org/Data.aspx?d=ComTrade&f=_l1Code%3A71

De la revisión bibliográfica efectuada se constató que, con excepción del estudio de Argüello y Cuchí (2008) no existen estudios locales (en la zona de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas) suficientes sobre las emisiones de GEI que causa la fabricación de los materiales de construcción. Este desarrollo de investigaciones en este campo es muy importante ya que la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas sufre un acelerado crecimiento poblacional (2.7% en el período 2000-2005) con la consecuente demanda de viviendas que crecieron de 99,900 en 2000 a 124,695 en 2005 (INEGI, 2006). Esta situación permite vislumbrar la oportunidad de intervenir académicamente con datos duros sobre las afectaciones ambientales de las diversas opciones constructivas que orientes en lo posible la toma de decisiones durante la etapa de planeación urbana y durante los diseños arquitectónicos de fraccionamientos en esta ciudad.

Por otra parte, en los estudios de emisiones por edificación de viviendas que se consultaron durante la revisión bibliográfica, se apreciaron las siguientes deficiencias:

- No consideran las emisiones por mano de obra. En este rubro es importante desarrollar la metodología que permita considerar las emisiones fisiológicas (directas) de la mano de obra así como las emisiones causadas por los consumos de bienes y servicios de los obreros.
- Se consideran las emisiones por los materiales empleados pero en los factores de emisión no se consideran las emisiones indirectas por lo que resulta importante estudiar las emisiones provocadas por la fabricación y transporte de los materiales considerando la cadena de insumos que se requieren para la fabricación de cada material (Alcance 3).

- No se consideran las emisiones por las actividades de administración de la obra (central y de campo).
- No se consideran las emisiones por los cambios en el uso del suelo.

4 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

4.1 Objetivo general. Estimar las emisiones de GEI debidas a la construcción de viviendas multifamiliares de interés social en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas en el período 2008-2010.

4.2 Objetivos particulares.

- Estimar las emisiones de GEI atribuibles a la construcción de tres diferentes tipos de viviendas multifamiliares de interés social en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Identificar materiales y procesos de construcción de viviendas multifamiliares de interés social de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, que más influyen en las emisiones de GEI.

4.3 Hipótesis.

- Los muros, sistemas de piso, recubrimientos, cimentaciones, cancelerías e instalaciones de las viviendas multifamiliares de interés social que se construyen en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, son diferentes y contribuyen de manera distinta a las emisiones de GEI por los insumos requeridos para su construcción.
- Las emisiones de GEI por cambios en el uso de suelo varían según los diferentes diseños empleados en la construcción de viviendas multifamiliares de interés social en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

- Las emisiones de GEI por la mano de obra empleada en la construcción de viviendas de interés social en Tuxtla Gutiérrez es un factor indispensable a considerar en las comparativas de emisiones de GEI.

5 MÉTODOS

5.1 Descripción del sitio en estudio.

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez se ubica en la Depresión Central del Estado de Chiapas entre los paralelos $16^{\circ}38'$ y $16^{\circ}51'$ de latitud norte y los meridianos $93^{\circ}02'$ y $93^{\circ}15'$ de longitud oeste (Figura No. 3). La altitud en este municipio varía entre 200 y 1 500 m.



Figura No. 3 Ubicación general de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Fuente: H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (2008)

El municipio colinda al norte con los municipios de San Fernando, Osumacinta y Chiapa de Corzo; al este con el municipio de Chiapa de Corzo; al sur con los municipios de Ocozucuatla de Espinoza y Suchiapa y al oeste con los municipios de Ocozucuatla de Espinoza y Berriozabal (INEGI, 2006).

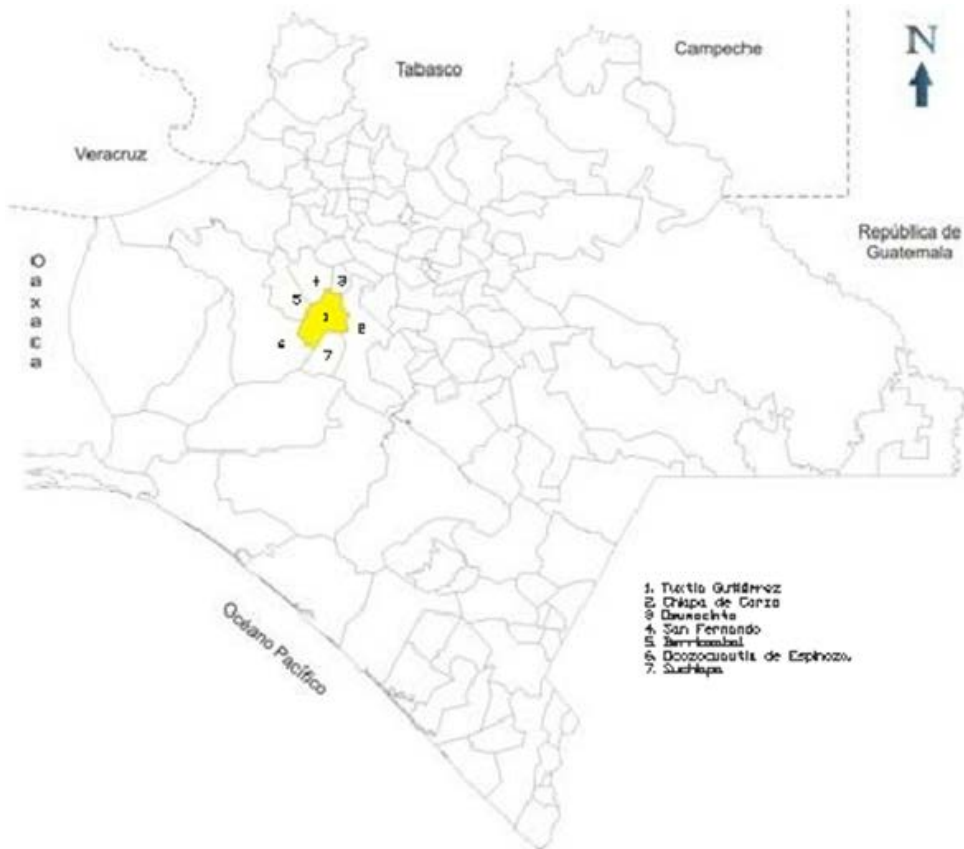


Figura No. 4 Colindancias del municipio de Tuxtla Gutiérrez.

Fuente: Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal (2005)

Este municipio ocupa un área de 412.40 km² que representan el 0.55% de la superficie del estado, cuenta con 108 localidades y contaba el año 2005 con una población de 503 320 habitantes (INAFED, 2005).

Por su fisiografía el municipio de Tuxtla Gutiérrez se ubica en la Provincia de Sierras de Chiapas y Guatemala, dentro de esta provincia este municipio se encuentra en la

subprovincia denominada Depresión Central y Altos de Chiapas. El sistema de topoformas corresponde a una llanura aluvial con lomerío (34.25%), sierra alta de laderas tendidas (30.42%), meseta típica (25.31%), valle de laderas tendidas con lomerío (4.22%), lomerío típico (3.74%) y cañón típico (2.06%). Tiene un clima que se clasifica como cálido subhúmedo con lluvias en verano, menos húmedo. La temperatura promedio es de 25.4°C, con una temperatura máxima promedio anual registrada de 26.6°C y una mínima en promedio anual de 24°C (INEGI, 2006). La precipitación promedio anual es de 951 mm calculada en el período 1948-2000, siendo el máximo promedio anual de 1340 mm y la mínima de 610 mm (INEGI, 2006). Los meses de lluvia son de mayo a octubre con un máximo en junio.

La ciudad ha tenido un rápido crecimiento en los últimos años, extendiendo la mancha urbana grandemente a través de la creación de fraccionamientos debidamente urbanizados así como de asentamientos irregulares que carecen de servicios básicos en alguna medida. La vivienda de interés social, por su bajo costo, es construida en zonas periféricas de la ciudad, en terrenos de poco valor comercial, contribuyendo a acrecentar la mancha urbana. Un caso extremo de este fenómeno se aprecia en la construcción de fraccionamientos de interés social en municipios vecinos (Chiapa de Corzo, Ocozocuautila, Berriozabal, Suchiapa e incluso Villaflores) que son adquiridos por personas de familias que realizan sus actividades de manera preponderante en Tuxtla Gutiérrez y deben viajar distancias considerables de manera rutinaria. En este estudio solo se analizan las viviendas de interés social construidas dentro del municipio de Tuxtla Gutiérrez.

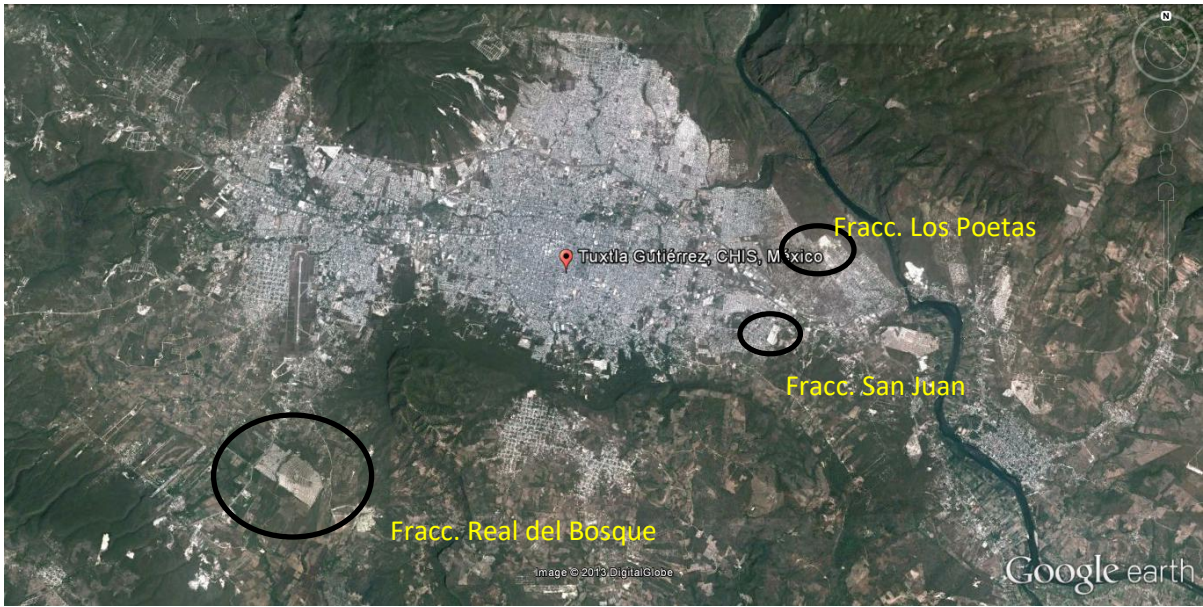


Figura No. 5. Ubicación de los fraccionamientos en estudio. Fuente: Google Earth.

Fraccionamiento Los Poetas. Este conjunto habitacional se compone de edificios de cuatro departamentos en dos niveles (dos departamentos en planta baja y dos departamentos en planta alta). La cimentación consta de una losa de concreto armado $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$, con zonas reforzadas bajo los muros. Las losas de entrepiso y azotea son macizas de concreto armado $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ de 0.10 m de espesor. Los muros se diseñaron de concreto armado $f'c=100 \text{ kg/cm}^2$ de 0.10 m de espesor. Se ubica al noreste de la ciudad sobre una colina con coordenadas geográficas $16^\circ 45' 12''$ Norte y $93^\circ 03' 44''$ Oeste con elevación de 643 msnm. Este fraccionamiento ocupa un área de 6 ha aproximadamente, incluyendo vialidades, áreas verdes y de servicios. El área construida actual (marzo, 2013) aun no cuenta con el tipo de edificios que se presentan en este análisis, existiendo edificios de tres niveles con un diseño diferente al otorgado por el H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez durante la búsqueda de información para este análisis, sin embargo aun cuenta con un 30% del

área restante sin edificar, por lo que es probable que en esa área sea ejecutado el proyecto que aquí se analiza. Los edificios que se construyeron se encuentran ocupados parcialmente.

Fraccionamiento San Juan. Este fraccionamiento cuenta con una gran cantidad de edificios de tres niveles de la misma tipología. Un edificio tipo consta de dos cuerpos con 6 departamentos cada uno, unidos por una escalera exterior de concreto armado. Cada departamento cuenta con dos recámaras, una sala-comedor, una cocineta, un baño completo y un pequeño patio de servicio. Toda la estructura (muros, trabes y losas) está construida de concreto armado; los pisos son cerámicos, los muros no tienen más recubrimiento que una pintura texturizada, las ventanas son corredizas de aluminio, las puertas son de tableros compuestos y las cerraduras son de pomo. El análisis considera una unidad de este tipo de edificios (12 departamentos). Este conjunto habitacional se ubica al sureste de la ciudad en las coordenadas geográficas 16° 43' 55.30" Norte y 93° 03' 57" Oeste y una elevación de 590 msnm. El fraccionamiento ocupa un área de 6.5 ha aproximadamente, incluyendo vialidades, áreas verdes y de servicios. En la actualidad (marzo de 2013) la totalidad de los edificios fueron construidos, todos bajo el proyecto tipo que aquí se analiza. La mayor parte de los edificios se encuentran en funcionamiento.

Fraccionamiento Real del Bosque. En este fraccionamiento uno de los tipos de vivienda que se construyeron son viviendas cuádruples de dos niveles, con dos departamentos por nivel y escaleras exteriores. La cimentación está estructurada con una losa de concreto armado de 11 cm de espesor. Los muros son de bloques huecos de concreto armados interiormente con refuerzos adicionales de castillos y dalas. Los entrepisos y azoteas son construidos con el sistema de vigueta y bovedilla

con 0.16 m de espesor total. Este fraccionamiento se ubica al suroeste de la ciudad, cerca del Aeropuerto Militar, en las coordenadas 16° 42' 09" Norte y 93° 10' 21" Oeste con elevaciones que varían entre 546 msnm y los 612 msnm. La mayoría de los edificios se encuentran en servicio.

5.2 Recopilación de información documental acerca de las viviendas de interés social construidas en el período 2008-2010.

Se consultó la información de las viviendas de interés social que fueron construidas en el período 2008-2010. Para lo cual se investigó en los registros que se tenían disponibles en el H. Ayuntamiento Municipal de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Los fraccionamientos de interés social construidos en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez durante el período 2008-2010, de los que se disponía de los proyectos ejecutivos, y que por lo tanto conformaron nuestro caso de estudio, fueron todos de vivienda multifamiliar y únicamente se disponían de tres conjuntos habitacionales. Estos proyectos difieren en cuanto a su diseño arquitectónico y en cuanto a algunos de sus elementos constructivos, siendo de especial interés el caso del empleo de muros de concreto armado en los edificios Los Poetas y San Juan que se podrán comparar con los muros de bloques de concreto del edificio Real del Bosque; otro elemento de comparación relevante son los sistemas de piso y techumbres que en los dos primeros casos son constituidos por losas de concreto armado coladas in situ y en el caso del edificio Real del Bosque son diseñados con el sistema de vigueta-bovedilla. Otros aspectos que estas edificaciones permitirán comparar son las relativas a las instalaciones hidrosanitarias, instalaciones eléctricas, cancelería, acabados y recubrimientos que presentan diferencias en cuanto al diseño y que por lo mismo se esperan diferencias en cuanto a las emisiones de GEI atribuibles a ellas. Por su

diseño se espera que los edificios de mayor número de niveles presenten menores impactos por cambios en el uso del suelo.

- Fraccionamiento Los Poetas.
- Fraccionamiento San Juan.
- Fraccionamiento Real del Bosque. Vivienda Palma Real 08 de Block.

Los proyectos ejecutivos constaron de los planos arquitectónicos, estructurales, instalaciones eléctricas, instalaciones hidrosanitarias y acabados. La lista de planos de cada fraccionamiento es la siguiente:

Fraccionamiento Los Poetas:

- Plano Arquitectónico A-01.
- Plano Arquitectónico A-02.
- Losa de Cimentación E-01.
- Losa de Cimentación E-02.
- Losa de Entrepiso E-03.
- Losa de Azotea E-04.
- Armado de Escalera E-05.
- Instalaciones. Hidráulica. IH-01.
- Instalaciones. Hidráulica. IH-02.
- Instalaciones. Hidráulica. IH-03.
- Instalaciones. Eléctrica. IE-01.
- Instalaciones. Eléctrica. IE-02.
- Instalaciones. Sanitaria. IS-01.
- Instalaciones. Sanitaria. IS-02.

- Acabados. Plantas. AC-01.
- Acabados. Fachada y Corte. AC-02.

Fraccionamiento San Juan:

- Arquitectónicos A-01.
- Arquitectónicos y fachadas. A-02.
- Fachada y Cortes A-03.
- Cancelería y Acabados A-04.
- Cancelería y Acabados A-05.
- Albañilería A-06.
- Albañilería A-07.
- Arquitectónico Escalera A-08.
- Estructural E-01.
- Estructural E-02.
- Estructural Escalera E-03.
- Estructural Monolítico E-04.
- Estructural Monolítico E-05.
- Instalación Eléctrica IE-01.
- Instalación Eléctrica IE-02.
- Diagramas y Cuadros IE-03.
- Instalación Hidrosanitaria IHS-01.
- Instalación Hidrosanitaria IHS-02.
- Isométrico Hidráulico y Detalles IHS-03.

- Isométrico Sanitario IHS-04.

Fraccionamiento Real del Bosque.

- Arquitectónico PTP PRE 08-01.
- Estructural de Cimentación PRE-002. 2/6.
- Estructural de Muros. PRE-003. 3/6.
- Estructural-Losas. PRE-004. 4/6.
- Instalaciones 01. PRE.005. 5/6.
- Instalaciones 02. PRE-006. 6/6.

La información disponible en estos planos es la suficiente para generar los inventarios de materiales, mano de obra y equipos de cada edificio tipo con los que cuenta cada fraccionamiento.

5.3 Metodología para la estimación de las emisiones de GEI.

Se sigue la metodología general de análisis de ciclo de vida establecida en las normas ISO 14040, empleando el método híbrido de análisis de procesos incrementado (Bilec, 2007). Esta metodología permite establecer los alcances del análisis, por lo que para este análisis se consideran las emisiones por la edificación y mantenimiento. Se excluye la etapa de uso y la etapa de demolición debido a que se centra el interés de este análisis en las emisiones atribuibles a los materiales y elementos constructivos, por lo que no es relevante la consideración de la etapa de consumos durante el uso ni la demolición de los edificios.

Con la finalidad de centrar el análisis en los edificios en sí, sin considerar las obras complementarias que se construyen en los fraccionamientos y considerando que el método de análisis de ciclo de vida permite definir las fronteras y alcances de cada análisis (Crawford, 2011) se define como unidad funcional un metro cuadrado de edificación. No se consideran las emisiones debidas a los trabajos de urbanización, ni a las áreas de estacionamientos.

Se evalúan los alcances 1, 2 y 3 (Bathia et al, 2011, PRéConsultants, 2004) al considerar las emisiones por el consumo de combustibles fósiles y por cambio en el uso de suelo en el sitio de la edificación (Alcance 1), las emisiones por actividades de la edificación ocasionadas en otros sitios (Alcance 2: energía eléctrica y combustibles fósiles consumida en actividades indirectas atribuibles a la obra), así como las emisiones de GEI debidas a actividades generadas en instalaciones que no son propiedad del constructor o bien no son controladas por él (Alcance 3: emisiones por la extracción, transporte y procesamiento de materiales).

5.3.1 Método general de análisis de emisiones de GEI para las edificaciones.

Para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero atribuibles a la edificación de las viviendas multifamiliares seleccionadas se empleará el método híbrido de ACV de análisis de procesos incrementado, basando este análisis en el seguimiento de un análisis de emisiones de GEI paralelo al análisis de los costos.

De acuerdo con esta consideración se calculan las emisiones correspondientes a los insumos necesarios para edificar cada vivienda: materiales, equipos, mano de obra y consumos por administración.

Adicionalmente a las emisiones de GEI atribuibles a la fabricación y transporte de materiales y equipos, a las emisiones por mano de obra y a las emisiones por

actividades de administración, se calculan las emisiones por el cambio en el uso del suelo.

Para tomar en cuenta que existen elementos de la edificación que tienen un tiempo de vida más corto que el del edificio en su conjunto, se calculan las emisiones atribuibles al reemplazo estos elementos durante la vida útil del edificio.

El procedimiento general de análisis se presenta en la Figura No. 6:

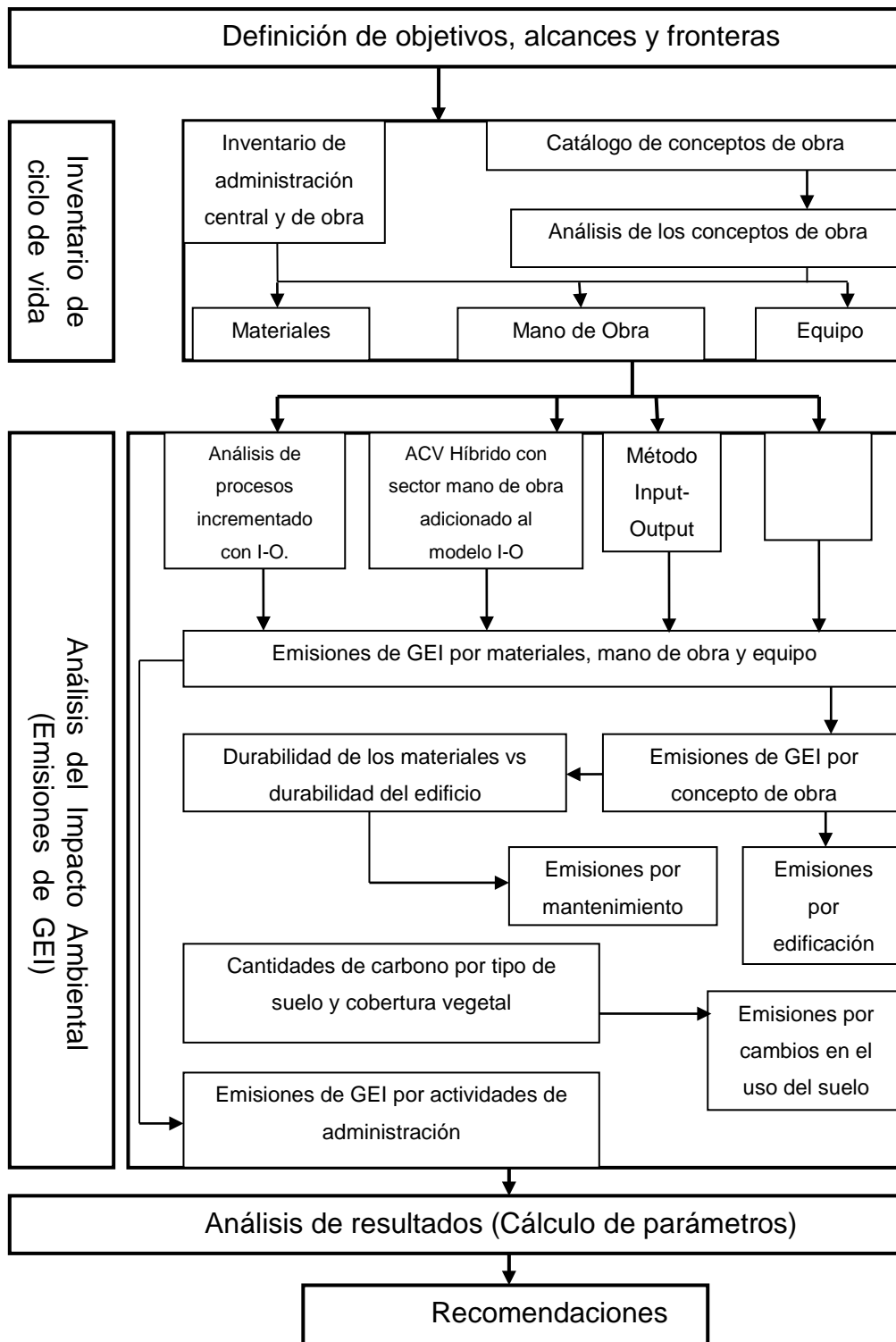


Figura No. 6 Esquema general de análisis.

Fuente: Desarrollo propio.

Las emisiones de GEI por cambio en el uso de suelo se calcularon empleando los cálculos de De Jong (2001) y el tipo de vegetación existente en la zona. Al

urbanizarse se considera que el carbono contenido en la biomasa y en la capa vegetal del suelo se emite a la atmósfera a través de la quema directa o por la descomposición de la materia orgánica. Las emisiones por las actividades de construcción se calcularon considerando los materiales, mano de obra y equipo que se emplean en cada concepto de obra y multiplicando los mismos por sus correspondientes factores de emisión que relacionan las cantidades unitarias de un material, equipo o mano de obra con las emisiones correspondientes de GEI. Estos factores de emisión se calculan a su vez empleando diversos métodos, siendo el método híbrido de análisis de procesos incrementado el más empleado. Cuando no es posible la aplicación de este método debido a la falta de información, se calculan los factores de emisión mediante el método Input-Output. Como una alternativa al método anterior se emplean factores de emisión seleccionados de bases de datos o de investigaciones previas.

Para estimar las emisiones debidas a la administración de la obra se determina un inventario de materiales, instalaciones, equipos y mano de obra que se utilizan de manera general a la obra, considerando tanto la administración central de la empresa constructora como la administración de la obra en sí. Los datos del inventario se toman de un modelo general de administración de empresas constructoras (Suárez, 1997). Con base en este inventario y siguiendo los mismos procesos que se siguen para la presupuestación de las obras, se calcula un Factor de Emisiones Indirectas por administración. Este factor multiplica a las emisiones debidas a las actividades de construcción (excluyendo cambio en el uso de suelo), siendo el resultado las emisiones atribuibles a las actividades de administración.

5.3.2 Modelo Input-output para complementar los análisis híbridos de los materiales, equipos y edificaciones.

Se elaboró un modelo matemático Input-Output de la economía mexicana partiendo de la Matriz Insumo-Producto (MIP) más reciente que data del año 2003¹¹. Esta matriz se manipula dividiendo cada elemento de cada columna entre la Producción Total del sector de la economía al que pertenece la columna (Miller y Blair, 2009). La matriz resultante se denomina Matriz de Coeficientes Técnicos o matriz A. La economía mexicana fue analizada considerando 20 sectores que a su vez son descompuestos en un total de 79 subsectores, por lo que la MIP y la Matriz de Coeficientes Técnicos son matrices cuadradas de 79 x 79. La matriz de coeficientes técnicos contiene la información de las demandas de cada sector de la economía a la economía total, para la producción de una unidad monetaria. La Matriz Inversa de Leontief o Matriz de Requerimientos Totales, se calcula siguiendo el procedimiento desarrollado por Wassily Leontief en 1936 empleando la fórmula siguiente (Miller y Blair, 2009):

$$L = (I-A)^{-1}$$

Esta matriz forma el núcleo del modelo Input-Output. Las operaciones matriciales se efectúan empleando una hoja de cálculo de Excel. La aplicación del método Input-Output al cálculo de emisiones de GEI se efectúa con la fórmula siguiente:

$$e = E \cdot (I-A)^{-1}Y$$

Donde:

¹¹Consultada en junio de 2011 en www.inegi.org.mx.

$E = \mathbf{b}/\mathbf{P}$ Vector de emisiones sectoriales de GEI por unidad monetaria, calculado dividiendo las emisiones anuales de GEI de cada sector de la economía (\mathbf{b}) entre la producción total (\mathbf{P}) de ese sector en el año de referencia.

e: Emisiones totales de GEI por la producción de un producto.

\mathbf{Y} : vector de requerimientos a la economía para la producción de un producto.

$(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1} = \mathbf{L}$: Matriz Inversa de Leontief o Matriz de Requerimientos Totales.

La determinación del vector \mathbf{b} de factores de emisión de GEI ha sido efectuado con anterioridad (Ruiz, 2011). Estos factores de emisión fueron calculados con base en inventarios de emisiones nacionales y reportes de la industria, asignando los factores de emisión restantes con base en “...valores que reflejaran de manera aproximada su participación en el total de emisiones. Para ello se distribuyeron las emisiones en cada rama por su participación relativa en el Valor Agregado Bruto (VAB) dentro del sector correspondiente en el mismo año (2003)”. El objeto de este trabajo es el de reconstruir el vector de factores de emisión de GEI tomando los datos de los factores de emisión de GEI de los 25 sectores que publica en su artículo, y que fueron calculados con base en reportes de inventarios, y calcular los factores de emisión restantes empleando una metodología de asignación diferente que parte de las emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles de cada sector, para lo cual se calculan las emisiones con base en las compras que efectuó cada sector al sector 23 (Fabricación de productos derivados del petróleo y el carbón).

Una segunda modificación al vector de emisiones sectoriales presentado por Ruiz (2011) se hace en los sectores 1 (Agricultura) y 3 (Aprovechamiento Forestal), considerando las emisiones reportadas por Uso del Suelo Y Cambios en el Uso del

Suelo y Silvicultura (USCUSyS) que reporta para el año 2003 un aproximado de 70,000 Gg CO₂e (De Jong et al, 2010), valor superior al considerado por Ruiz (2011) para el sector 3 de 51,500 Gg CO₂e. Por otra parte para el sector 1 Ruiz (2011) consideró 7,479.1 Gg CO₂e, mientras que en el Inventario Nacional de Emisiones de GEI 2006 se reporta que para el año 1990 las emisiones de GEI fueron de 47,427.5 Gg CO₂e y para el año 2006 fueron de 45,552.1 Gg CO₂e, con una tasa de variación anual de -0.3%, por lo que una estimación de las emisiones del año 2003 sería de 45,904 Gg CO₂e.

El objetivo general de este cálculo es obtener el vector de factores de emisión de GEI aplicable a la Matriz Insumo-Producto de la Economía Nacional Mexicana del año 2003. Para calcular las emisiones sectoriales faltantes se considera la hipótesis de que la generación de GEI de cada sector de la economía mexicana proviene de la combustión de combustibles fósiles, que son producidos por el sector 23 (Fabricación de productos derivados del petróleo y el carbón). Esta hipótesis se sustenta en el hecho de que las otras fuentes de emisiones de GEI ya están consideradas en los 25 sectores de los que se dispone de información directa.

El procedimiento de cálculo es el siguiente: Se parte de la información obtenida por Ruiz (2011) y se complementa para los sectores faltantes de acuerdo a lo siguiente:

- Se toman, para cada sector en análisis, los montos correspondientes a sus compras al sector de fabricación de combustibles. Estos montos se obtienen directamente de la Matriz Insumo-Producto (MIP) de la Economía Total de México del año 2003, correspondiendo las compras de un sector a los otros sectores de la economía a un vector columna dentro de la MIP.
- Se calculan los factores de emisión de GEI de cada sector, de los sectores de

los que no se dispone de información directa de sus emisiones, calculando el número de litros de combustible que adquirió el sector y multiplicando este consumo por el factor de emisión directa de GEI de los combustibles.

De acuerdo con Ruiz (2011) las emisiones de GEI de los sectores de la economía nacional que más impactan son:

Tabla No. 8: Principales ramas económicas generadoras de GEI

Rama	Emisiones de GEI en Gg CO ₂ e
Generación, transmisión y suministro de energía eléctrica	120,844.7
Autotransporte de carga	52,860.5
Aprovechamiento forestal	51,500.0
Transporte terrestre de pasajeros, excepto por ferrocarril	51,431.7
Fabricación de productos a base de minerales no metálicos	40,156.7
Manejo de desechos y servicios de remediación	37,256.0
Extracción de petróleo y gas	37,253.4
Ganadería	37,249.7
Fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón	36,940.8
Agua y suministro de gas por ductos al consumidor final	30,063.1
Industrias metálicas básicas	11,079.7
Industria química	8,475.9
Agricultura	7,479.1
Industria alimentaria	7,052.0
Transporte aéreo	6,346.6
Minería de minerales metálicos y no metálicos excepto petróleo y gas	2,637.2
Fab. de equipo de computación. y de otros equipos y accs. Electrónicos	2,375.7
Transporte por agua	2,296.1
Industria del papel	1,643.7
Transporte por ferrocarril	1,567.2
Fab. de equipo de generación eléctrica y aparatos y accs. Eléctricos	1,397.0
Fabricación de prendas de vestir	1,382.1
Industria de las bebidas y del tabaco	1,373.9
Fabricación de productos metálicos	1,281.8
Comercio	1,252.5
TOTAL	553,197.0

Fuente: Ruiz (2011)

Considerando los datos de Ruiz (2011) El total de las emisiones de GEI del año 2003 fue de 563,337.1 Gg CO₂e, por lo que las emisiones de los sectores restantes fueron 10,140.1 Gg CO₂e, que representan el 1.8% restante del total de las emisiones de GEI del año 2003.

Para calcular las emisiones directas de GEI por cada millón de pesos del año 2003,

se parte del precio promedio de los combustibles en el año 2003 (PEMEX, 2004):

Gasolina: \$6.04

Diesel: \$5.01

Suponiendo que el consumo de diesel y gasolina fuese en partes iguales, el precio promedio de estos combustibles era de \$5.525/lt, por lo que con un millón de pesos del año 2003, se podían adquirir:

Gasolina: 90,497 l

Diesel: 90,497 l

Las emisiones directas por la combustión de estas cantidades de diesel y gasolina se calculan empleando los factores de emisiones desarrollados con base en el reporte AP-42 (EPA):

Factor de emisión directo para gasolinas: 2.311 kg CO₂/l

Factor de emisión directo para diesel: 2.644 kg CO₂/l

Emisiones de GEI por combustión de gasolina = 90,497 l * 2.311 kg CO₂/l
= 209,138 kg CO₂ e.

Emisiones de GEI por combustión del diesel = 90,497 l * 2.644 kg CO₂/l
= 239,274 kg CO₂ e.

Emisiones totales de GEI por millón de pesos 2003 que cada sector de la economía gastó en 2003: 448,412 kg CO₂e.

Factor de emisión por combustión directa: 0.448412 Gg CO₂e/MP.

Multiplicando este factor de emisiones por los consumos de combustibles de los

sectores faltantes se termina de construir el vector de emisiones **b**. Los cocientes de las emisiones sectoriales **b** entre la producción total de cada sector **P**, nos da como resultado el vector de emisiones por unidad monetaria **E**, el cual se puede aplicar directamente al modelo Input-Output.

El vector de emisiones sectoriales completo se presenta en el Anexo D.

5.3.3 Modelo Input-Output ampliado para la estimación de emisiones de GEI por mano de obra directa.

Para el cálculo de las emisiones de GEI atribuibles a la mano de obra directa se optó por emplear un método híbrido que consiste en desagregar de la matriz de insumo-producto a un subsector de la economía, para poder tomar en consideración las emisiones de GEI fisiológicas de los obreros más aquellas que derivan de sus consumos. En este enfoque se tiene la ventaja de integrar todas las emisiones de GEI atribuibles a la mano de obra dentro del modelo económico nacional. En este caso la mano de obra interviene en todos los sectores económicos, por lo que se agrega a la MIP un vector y una columna correspondientes a la mano de obra. Los datos de las cantidades de mano de obra que demanda cada sector están consignados por el INEGI en su reporte de Remuneraciones por Subsector que se puede consultar en su página de internet. Para estimar la demanda del sector de la mano de obra a los diferentes sectores económicos se emplean los resultados de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH).

Las emisiones directas de GEI del sector de Mano de Obra se calculan con base en las emisiones orgánicas calculadas por West et al (2009).

Con la matriz ampliada de coeficientes técnicos y el vector ampliado de emisiones directas de GEI, se calculan las emisiones correspondientes a la mano de obra

clasificándola de acuerdo al nivel de ingresos de acuerdo a la clasificación de deciles que establece el INEGI en la ENIGH.

La demanda del sector de mano de obra a los demás sectores se presenta en forma de una matriz (**L**) con 80 filas y 10 columnas, representado cada fila un sector económico y cada columna el decil de la población según su ingreso.

Para efectuar este cálculo se emplea la fórmula siguiente, deducida exprofeso para este caso:

$$\mathbf{MDF} = (\mathbf{I-A})^{-1} \cdot \mathbf{D}$$

$$\mathbf{VEST} = \mathbf{VESD} \cdot \mathbf{MDF}$$

$(\mathbf{I-A})^{-1}$: Matriz Inversa de Leontief Ampliada (80x80).

D: Matriz de demanda del sector de mano de obra, desglosado en deciles, a la economía (80x10).

MDF: Matriz de demanda final por mano de obra (80 x 10).

VESD: Vector de emisiones sectoriales directas (80 x1)

VEST: Vector de emisiones sectoriales totales por mano de obra (80x1)

5.3.4 Análisis híbrido de ciclo de vida para la estimación de emisiones de GEI de materiales y equipos de construcción.

Se calculan las emisiones directas (Alcance 1) de GEI por cada unidad funcional analizada, empleando datos de reportes de inventarios existentes y otros reportes científicos. Cuando se requiere se calculan los factores de emisión directos complementando los datos provenientes de los reportes de inventarios de GEI con los datos de producción de la empresa productora en el año considerado.

A las emisiones directas, o de alcance 1, se le adicionan las emisiones por consumo de energía eléctrica (Alcance 2). Por último se estiman las emisiones de GEI debidas a la fabricación de maquinarias, equipos e instalaciones aplicando el método Input-Output y las emisiones debidas al transporte a la obra (Alcance 3), los inventarios de equipos e instalaciones son obtenidos de estados contables publicados por las empresas. Todas las emisiones de GEI se calculan para una unidad funcional del material o equipo analizado. Las emisiones de GEI por consumo de energía eléctrica se calculan siguiendo el mismo procedimiento.

5.3.5 Método para la estimación de las emisiones de GEI atribuibles a las actividades indirectas de la mano de obra.

Las emisiones de GEI por mano de obra, calculadas con la Matriz Ampliada de Insumo-Producto, reflejan las actividades de emisiones directas e indirectas de los trabajadores que participan en el proceso de edificación. Adicionalmente a estas actividades las empresas constructoras deben pagar por actividades relativas a la salud y vivienda de los trabajadores. Estas actividades también generan emisiones de GEI que son calculadas aplicando el Método Input-Output de la siguiente manera:

- Las emisiones de GEI por actividades de salud (pago de IMSS) son calculadas mediante el promedio de los factores de emisión de los sectores de Hospitales y de Consulta Externa.
- Las emisiones de GEI por el pago al INFONAVIT se consideran en el sector Edificación.
- Las emisiones por el pago del SAR (Sistema de Ahorro para el Retiro) se consideran en el sector de Compañías de fianzas, seguros y pensiones.

- Las emisiones por el pago del Impuesto sobre Nómina se consideran en el sector de Actividades Gubernamentales.

El cálculo de las emisiones de GEI por la mano de obra sigue, de manera detallada y de forma paralela, el cálculo de costos de mano de obra.

5.3.6 Método para la estimación de las emisiones de GEI por actividades de mantenimiento de las edificaciones.

En cada edificación se cuentan con elementos de menor durabilidad que la edificación en sí, por lo que al cabo de un tiempo estos elementos deben ser reemplazados. Es el caso, por ejemplo, de los focos incandescentes que tienen una vida promedio de 1000 horas y que por lo tanto deben ser cambiadas con cierta periodicidad. Para tomar en cuenta estos cambios, se calculan las veces que habrá que cambiar cada elemento de la edificación y se multiplican las emisiones correspondientes a ese elemento por este factor, obteniendo emisiones totales por causa del elemento considerado. Para determinar las emisiones por mantenimiento se resta del total obtenido las emisiones calculadas por la edificación inicialmente.

Con base en la revisión bibliográfica de la durabilidad de los edificios y de los materiales, para los efectos de esta tesis se considerará que el edificio tendrá una vida útil de 50 años y que durante ese período no requerirá de acciones de reestructuración. Para el caso de los pisos cerámicos se considerará una vida útil de 25 años. Para los muebles sanitarios se considerará una vida útil de 25 años (o sea que se reemplazarán en una ocasión durante la vida útil del edificio). Para los tinacos de plástico se considerará una vida útil promedio de 15 años. Para la pintura se considerará una vida útil de 10 años.

5.3.7 Método para la estimación de las emisiones de GEI por cambios en el uso del suelo.

Los suelos y la cobertura vegetal sobre ellos contienen carbono almacenado en forma de materia orgánica. Las cantidades de carbono que los suelos tienen dependen de su tipo y de su cobertura vegetal. En la zona de la Depresión Central de Chiapas no se han reportado estudios acerca de las cantidades de carbono contenidas en los suelos y su cobertura vegetal, por lo que de modo suplementario y asumiendo las diferencias que en las estimaciones de las emisiones de GEI por los cambios en el uso del suelo se presentarán, se tomarán los datos de las cantidades medidas en la Zona Altos de Chiapas por De Jong (2001), quien analizó diversos casos de cobertura vegetal. Esta decisión de tomar datos de otra zona se hace considerando que la estimación de las emisiones de GEI por este rubro es muy relevante como para no tomarla en cuenta, a pesar de la tosquedad de la estimación derivada de la falta de datos locales. La estimación de las emisiones de GEI a la atmósfera por los cambios en el uso del suelo que se generan a partir de la urbanización, se hace considerando que para urbanizar se efectúan trabajos de desmonte y despalme. En los trabajos de desmonte y despalme se cortan todas las especies vegetales a nivel del suelo y la capa vegetal (espesores de 20 a 30 cm de suelo) desperdiándose los materiales vegetales y la tierra vegetal obtenidos en tiraderos o bien en rellenos sanitarios. Se considera que todo el carbono contenido en los suelos y la materia vegetal se transforma en bióxido de carbono a través de distintas vías (quema o descomposición), por lo que las emisiones de bióxido de carbono a la atmósfera se calculan multiplicando las cantidades de carbono en peso por la relación entre los pesos atómicos del bióxido de carbono al carbono (44/12).

Para el caso de los fraccionamientos analizados, estos se ubican en zonas en las que existían selvas bajas subcaducifolias. Según De Jong (2001) se tienen contenidos de carbono de 222 toneladas por hectárea de bosques degradados o fragmentados. Debido a que no existen datos de cantidades de carbono que se almacenan en las selvas bajas subcaducifolias que existen en las zonas donde se ubican los fraccionamientos en estudio, se considera para los cálculos de emisiones por cambios en el uso de suelo las cantidades de carbono correspondientes a los bosques degradados o fragmentados considerando, dada la falta de información local sobre este asunto, que las cantidades de carbono contenidas fuesen similares.

5.3.8 Método para la estimación de las emisiones de GEI atribuibles a las actividades de administración de la obra.

Para la ejecución de las obras de edificación se requiere de una estructura organizacional que permita operar a la empresa constructora. Esta administración se considera dividida en dos partes: la primera es la administración central que organiza y gestiona los recursos financieros, materiales y humanos que la empresa requiere para su funcionamiento y la ejecución de las obras que tenga en proceso; la segunda es la administración de una obra en específico en la que se gestionan los recursos que esa obra en particular requiera. Para la realización de las actividades administrativas se requiere de instalaciones, equipos, materiales y personal, que por su uso y fabricación emiten gases de efecto invernadero. Para evaluar estas emisiones, en un caso hipotético general, se supone la estructura administrativa central y de campo que usualmente se emplea en las obras, tomando para este caso una de las referencias técnicas más aceptada en el medio constructor (Salazar, 1997). Con este inventario de personal, materiales y equipo se procede a la

evaluación de las emisiones de GEI, considerando que las emisiones por el personal empleado se estiman por medio del Método Híbrido con la Matriz Inversa de Leontief Ampliada con el vector de mano de obra. Las emisiones por consumo de materiales, energía y equipos se estiman empleando el método Input-Output. Este análisis se realiza siguiendo con precisión el análisis que usualmente se efectúa para el cálculo de costos por los Indirectos de Obra, en el contexto de la presupuestación de obras.

5.4 Análisis de la información.

El análisis de los inventarios de materiales, equipos y mano de obra de cada edificación se efectuó empleando el programa de cómputo (NEODATA) diseñado para el cálculo de costos (Bonilla, 2011). En este programa se analiza, en un primer nivel, cada edificación en partidas, para enseguida desglosar dentro de cada partida los conceptos de obra. Para cada concepto de obra se determinan las cantidades de materiales, mano de obra y equipo que se requiere para su ejecución. La estimación de las emisiones de GEI se hace sustituyendo en este programa a los costos unitarios de los insumos por los factores de emisión de GEI correspondientes. El cálculo de las emisiones de GEI por reemplazo de materiales se hace en una hoja de cálculo de Excel, multiplicando las emisiones de cada concepto de obra por el número de veces que habrá que reemplazar ese elemento constructivo durante la vida útil del edificio.

6 RESULTADOS.

6.1 Análisis de las viviendas seleccionadas.

Las copias físicas de los planos de cada proyecto que se obtuvieron permitieron desglosar cada obra en partidas y cada partida en conceptos de obra.

Una vez elaborados los listados de conceptos se procedió a la generación de las cantidades de obra, de acuerdo a los planos correspondientes y con estos datos se alimentó la base de datos del programa de cómputo para el análisis de precios unitarios de obras NEODATA. Los listados de conceptos y cantidades de obra, en formato de presupuesto se presentan en el Anexo A.

6.2 Cálculo de los materiales, mano de obra y equipo empleados en la edificación de cada vivienda.

Con base en los análisis de precios unitarios llevados a cabo se obtuvieron los listados de materiales, mano de obra y equipo de cada vivienda multifamiliar analizada, empleando para ello el programa de cómputo NEODATA. Los listados obtenidos se presentan en el Anexo B.

6.3 Cálculo de la matriz inversa de Leontief para la economía mexicana del año 2003.

En este trabajo se manipuló, en el programa de cómputo Excel, la Matriz Insumo-Producto de la economía mexicana del año 2003 y de acuerdo al procedimiento detallado en la metodología se calculó la Matriz Inversa de Leontief correspondiente. Esta matriz se presenta en el Anexo C.

6.4 Factores de emisión de GEI por materiales empleados en las obras.

Las emisiones de GEI por unidad funcional de los diversos materiales, que por su participación en las emisiones totales de GEI de los edificios seleccionados,

intervienen en la edificación, se calculan de acuerdo a lo expuesto en la metodología.

Un resumen de estos cálculos es el siguiente:

6.4.1 Combustibles fósiles.

6.4.1.1 Gasolina.

Unidad Funcional: Un litro de Gasolina Magna.

Alcances: 1, 2 y 3.

Emisiones de GEI de Alcance 1: Se consideran las emisiones directas por la combustión.

Factores de emisión AP-42¹²:

1.08 lb CO₂/hp-hr de potencia de salida.

154 lbs CO₂/MMBtu de combustible de entrada.

69,916 g CO₂/(1'054.407 MJ) = 66.3 g CO₂/MJ

Por otra parte el poder calorífico de la gasolina según la (EPA) es de 20,300 Btu/lb, lo que equivale a 43.47 KJ/kg. Según el Gobierno Mexicano el poder calorífico de la gasolina es de 5,542 MJ/bl (DOF, 30 de noviembre de 2010), lo que equivale a 34.8581 MJ/l.

Considerando el poder calorífico publicado en el Diario Oficial de la Federación el 30 de noviembre de 2010 y el factor de emisión de la EPA, tendremos que el factor de emisión directo (FED) de la gasolina es igual a

$FED = 66.3 \text{ gCO}_2/\text{MJ} * 34.8581 \text{ MJ/l} = 2,311 \text{ gCO}_2/\text{l} = 2.311 \text{ kg CO}_2/\text{l}$

¹² Consultado en <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>

A modo de revisión se calcula el FED de las gasolinas empleando el poder calorífico reportado por la EPA y considerando una densidad de la gasolina de 0.75 kg/lit, obteniendo:

$$\text{FEDgasolinas} = 2.345 \text{ kgCO}_2\text{e/l gasolina}$$

Como se puede apreciar los valores obtenidos son muy semejantes. Para efectos de este análisis se tomará el factor de emisión directo de CO₂e para las gasolinas obtenido con el poder calorífico publicado en el DOF.

Los alcances 2 y 3 corresponden a los consumos de energía eléctrica y de otros productos y servicios requeridos para la producción de la gasolina. Se evalúan las emisiones de GEI empleando el método Input-output, considerando lo siguiente:

Costo promedio de producción de la gasolina en diciembre de 2002 (Altomonte y Rogat, 2004) era de \$2.309; el factor inflacionario en el período diciembre de 2002 al promedio 2003 fue de 1.018245¹³, por lo que el precio de la gasolina actualizado según el promedio del año 2003 sería de \$2.351, que será el valor empleado en este cálculo.

Aplicando el modelo Input-output para la demanda de un litro de gasolina a la economía, resulta que se emitieron en total 0.552 kg CO₂e para la producción de ese litro de gasolina.

El factor de emisiones totales (FET) por fabricación y combustión de un litro de gasolina magna en México en el año 2003 será la suma de las emisiones directas e indirectas:

$$\text{FET} = 2.863 \text{ kgCO}_2\text{e/l}$$

¹³ Consultado en http://www.sat.gob.mx/sitio_internet/asistencia_contribuyente/informacion_frecuente/inpc/43_872.html, el 10 de febrero de 2012

6.4.1.2 Diesel.

Unidad Funcional: Un litro de diesel.

Alcances: 1, 2 y 3.

Emissiones de GEI por combustión directa (Alcance 1).

Para el cálculo del factor de emisión directo emplearemos los factores de emisión consignados por la EPA en el informe AP-42¹⁴:

Factor directo de emisión = 1.15 lb CO₂/hp-hr de potencia de salida.

= 164 lbs CO₂/MMBtu de combustible de entrada.

= 74,456 g CO₂/(1'054.407 MJ) = 70.61 g CO₂/MJ

Poder calorífico: 42,000 kCal/kg

19,300 Btu/lb (EPA)

Densidad: 0.85 kg/l

Poder calorífico del diesel: 5,952 MJ/bl (DOF, 30 de noviembre de 2010).

De esta última referencia tendremos:

Poder calorífico del diesel = 5,952 MJ/158.987304 l

Poder calorífico del diesel = 37.43695 MJ/l

Considerando el poder calorífico publicado en el Diario Oficial de la Federación el 30 de noviembre de 2010 y el factor de emisión de la EPA, tendremos:

FED = 70.61 gCO₂/MJ * 37.43695 MJ/lts

FED diesel = 2,644 g CO₂/l

FED diesel = 2.644 kg CO₂/l

Emissiones de GEI por producción del diesel (Alcances 2 y 3):

¹⁴ Consultado en <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>

El precio de producción del diesel en diciembre de 2002 era de \$2.263 pesos (Altomonte y Rogat, 2004), actualizando este precio al promedio del precio en 2003, con base en el factor inflacionario calculado a partir del INPC, se obtiene que el precio de producción del diesel en promedio en 2003 se estima en \$2.304. Empleando este último valor para los cálculos de las emisiones de GEI mediante el modelo Input-output desarrollado se obtiene que las emisiones de GEI totales por la fabricación de un litro de diesel en México en 2003 fueron de 0.541 kg CO₂e/l.

El factor de emisiones totales (FET) del diesel será:

$$\text{FET} = 3.185 \text{ kg CO}_2/\text{l.}$$

6.4.1.3 Combustóleo.

El factor de emisiones para el combustóleo (fuel oil) que considera la EPA en su informe AP-42 distingue entre los diferentes tipos de combustóleo y su contenido de azufre, para el combustóleo pesado (tipo 6) con bajo contenido de azufre considera un factor de emisiones de 25 lb CO₂e/gal, mientras que para el combustóleo de alto contenido de azufre considera 24.4 lb CO₂e/gal.

Para los cálculos subsecuentes se considerará el promedio de los factores de emisiones proporcionados por la EPA para el combustóleo pesado (tipo 6).

$$\text{Factor de emisión directo} = 24.7 \text{ lb/gal} = 2.9597 \text{ kg CO}_2/\text{l}$$

Debido a que las emisiones derivadas del proceso de producción y transporte del combustóleo se derivan de procesos similares a los de la producción del diesel, se tomará el factor de emisión de GEI por producción del combustóleo iguales a las del diesel.

El factor de emisión total del combustóleo, tomando los datos de EPA serían:

$$\text{FET combustóleo} = 0.541 \text{ kgCO}_2/\text{lt} + 2.960 \text{ kg CO}_2/\text{lt} = 3.501 \text{ kg CO}_2/\text{lt.}$$

6.4.2 Energía eléctrica.

Unidad Funcional: Un kWh.

Alcances: 1, 2 y 3.

Las emisiones correspondientes al alcance 1 se calculan tomando como base el reporte de consumo de combustibles proporcionados por la SENER. Según este reporte se tiene que para el 2010 el consumo de combustibles del sector eléctrico, sin incluir el consumo de gas natural de los Productores Externos de Energía (PEE's) fue:

Combustóleo: 57'170,000 barriles * 158.987304 lt/barril = 9,089'304,170 lt

Diesel: 2'402,000 barriles = 381'887,504 lt

Carbón: 14'694,000 toneladas.

Gas Natural: 378,229 mmpc * 28,316.8 m³/mmpc = 1.0710253 * 10¹⁰ m³.

De acuerdo a su Quinto Informe de Labores 2010-2011 de la CFE (1° de septiembre de 2010 al 31 de agosto de 2011), se tuvo un consumo de gas natural de 1.9786251 * 10¹⁰ m³. Esto implicaría que el consumo de los PEE's fue de 0.9075998 * 10¹⁰ m³, en ese período, que aunque no coincide con el período anual 2010, su cantidad se puede considerar similar a la empleada en el período anual 2010, por lo que el consumo total de gas natural durante el 2010 se estima en:

$$1.0710253 * 10^{10} \text{ m}^3 + 0.9075998 * 10^{10} \text{ m}^3 = 1.9786251 * 10^{10} \text{ m}^3$$

Tabla No. 9: Factores de emisión directa por tipo de combustible

Combustible	CO ₂ [kg CO ₂ /TJ]	CH ₄ [kg CH ₄ /TJ]	N ₂ O [kg N ₂ O/TJ]
Carbón	94,600	1	1.5
Diesel	74,100	3	0.6
Combustóleo	77,400	3	0.6
Gas Natural	56,100	1	0.1

Fuente: IPCC, 2006.

El poder calorífico del carbón se puede considerar de 31 TJ/Gg, por lo que el factor directo de emisiones de GEI del carbón es: $31 \text{ TJ/Gg} * 94,600 \text{ kg CO}_2/\text{TJ} = 2'932,600 \text{ kg CO}_2/\text{Gg} = 2.9326 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$.

Las emisiones por la minería del carbón, de acuerdo al programa de cómputo EIOLCA, son de 4,240 ton CO₂e/MD.

El precio internacional del carbón en 2002 fue de \$19.52/short t (U.S. Energy Information Administration).

Una tonelada corta tiene 2000 lb equivalente a 908 kg, por lo que el precio por tonelada métrica del carbón en 2002 fue de \$21.50 Dólares/t.

Las emisiones de GEI por la minería de una tonelada de carbón en 2002 fueron: $\$21.50 \text{ Dólares/t} * 4.240 \text{ kg CO}_2\text{e/Dólar} = 91.16 \text{ kg CO}_2\text{e/t}$. Este factor de emisiones se debe sumar a las emisiones directas por la combustión del carbón, obteniendo un factor de emisiones totales de:

$$\text{FET} = 2.9326 \text{ kg CO}_2/\text{kg} + 0.09116 \text{ kg CO}_2\text{e/kg} = 3.02376 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}$$

Los factores de emisión totales de estos combustibles son:

- Combustóleo: 3.491 kg CO₂e/lt
- Diesel: 3.185 kg CO₂e/lt
- Carbón: 3,023.76 kg CO₂e/ton

Gas Natural: 2.4722 kg CO_{2e}/m³

Por lo que las emisiones por consumo de combustibles en la producción de energía eléctrica fueron:

Combustóleo: 3.173 * 10¹⁰ kg CO_{2e}

Diesel: 1.216 * 10⁹ kg CO_{2e}

Carbón: 4.443 * 10¹⁰ kg CO_{2e}

Gas Natural: 4.892 * 10¹⁰ kg CO_{2e}

Total: 1.263 * 10¹¹ kg CO_{2e}

La producción de energía eléctrica del sector eléctrico en México en el año 2010, de acuerdo a la SENER (Estadísticas del sector Eléctrico), sin considerar la producción de los Productores Externos de Energía (PEE's) fue de: 163,049'000,000 kWh. La aportación de los PEE's a la red nacional fue de 78,444 GWh, por lo que la producción total fue de 241,493'000,000 kWh.

Por lo que las emisiones directas de GEI por unidad de energía producida durante el 2010 fue de:

Factor de emisiones directas = 1.263 * 10¹¹ kg CO_{2e} / 2.41493 * 10¹¹ kWh

FED = 0.5230 kg CO_{2e}/kWh

El alcance 2 (consumo propio de energía eléctrica) se estima con base en las áreas de instalaciones y datos de consumo eléctrico de las mismas. En el año 2002 en el contexto del Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico, se efectuó un censo de las instalaciones (inmuebles y equipos) de la CFE, contabilizándose 3,049 inmuebles, con un área construida de 5'597,000 m², con 237,200 luminarias y 9,933 equipos de acondicionamiento ambiental, que consumían 228'400,000 kWh por año (Buitrón, 2004).

La producción eléctrica de la CFE durante el 2002 fue de 178,510 GWh (SENER), por lo que el consumo propio representó:

$$228,400 \text{ MWh}/178'510,000 \text{ MWh} = 0.0012795 = 0.12795\%$$

Factor de emisiones indirectas por consumo propio de energía eléctrica = 0.0012795

$$* 0.5230 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} = 0.0006691785 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh}.$$

Un segundo parámetro de cálculo fue presentado por la CFE (2006) cuando considera que para el año 2005 el consumo de energía por unidad de área de inmuebles y por año sería de 81.0 kWh/m²-año. Este parámetro es similar al presentado por la CONAE en su Listado de Oficinas Públicas Registradas, en el que calcula 82.16 kWh/m²-año. Considerando este último parámetro aplicado al área de instalaciones de la CFE en el año 2002 (5'597,000 m²), nos da una estimación del consumo anual de energía eléctrica en sus instalaciones de 459'849,520 kWh, por lo que el porcentaje de la producción de la energía eléctrica consumida en sus propias instalaciones respecto al total producido sería:

$$459'849.52 \text{ MWh}/178'510,000 \text{ MWh} = 0.002576 = 0.2576 \%$$

Las emisiones de GEI indirectas por el consumo propio de energía eléctrica serían a su vez: $0.002576 * 0.5230 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} = 0.001347248 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh}$

Este último valor se considera más preciso y será el que se emplee en los cálculos siguientes.

Las emisiones de GEI correspondientes al alcance 3 consideran aquellas emisiones debidas a procesos que ocurren fuera de la empresa o del control de la misma. Se incluyen en estos alcances las pérdidas técnicas en la transmisión y distribución de la energía eléctrica.

Las pérdidas técnicas fueron durante agosto de 2010 del 10.86%, ascendiendo durante agosto de 2011 a 11.70 %, este porcentaje se refiere al total transmitido a la red nacional, por lo que, considerando un porcentaje de pérdidas promedio del 11.28 %, la energía eléctrica perdida durante el 2010, fue de:

$0.1128 * 241,493'000,000 \text{ kWh} = 27,240'410,400 \text{ kWh}$, que implican emisiones para su generación de:

$27,240'410,400 \text{ kWh} * 0.5230 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} = 14,246'734,639 \text{ kg CO}_2\text{e}$

El factor de emisión de GEI por pérdidas técnicas durante la trasmisión y distribución es el siguiente: $1.424673 * 10^{10} \text{ kg CO}_2\text{e}/2.41493 * 10^{11} \text{ kWh}$.

$= 0.0589944 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh}$.

Las emisiones de GEI por depreciación de equipos se estiman, empleando el método Input-Output, con base en los Estados Financieros Dictaminados 2009 y 2010 de la CFE. De acuerdo a estos documentos se tienen activos en plantas, instalaciones y equipos por \$671,206'294,000.00, lo que generó depreciaciones en el año 2010 por \$27,209'353,000.00 (4% anual aproximadamente).

El factor inflacionario 2003-2010, calculado con base en el Índice Nacional de Precios y Cotizaciones (INPC) es de:

INPC 2003:	73.78373
INPC 2010:	99.74209
Factor inflacionario 2003-2010:	1.351815

Aplicando el inverso de este valor a las depreciaciones 2010, tenemos que el valor de las depreciaciones 2010 a precios del 2003 sería: \$ 20,128'014,924.91.

Por otra parte el factor de emisiones totales del sector industrial de Maquinaria y Equipo de México es: $0.0643964 \text{ kg CO}_2\text{e/Peso 2003}$.

Por lo que las emisiones totales por depreciación son:

$$= 0.0643964 \text{ kg CO}_2\text{e/Peso 2003} * \$ 20,128'014,924.91 = 1,296'171,700 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Las emisiones por unidad de energía (kWh) son:

$$= 1,296'171,700 \text{ kg CO}_2\text{e} / 163,049'000,000 \text{ kWh}$$

$$= 0.00794958 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh}$$

Las emisiones totales estimadas serán:

Emisiones directas:	0.5230	kg CO ₂ e/kWh
Emisiones por pérdidas técnicas:	0.0589944	kg CO ₂ e/kWh
Emisiones por depreciación:	0.00794958	kg CO ₂ e/kWh
Emisiones por consumo propio de energía eléctrica:	0.00134725	kg CO ₂ e/kWh
Emisiones totales:	0.591291	kg CO₂e/kWh

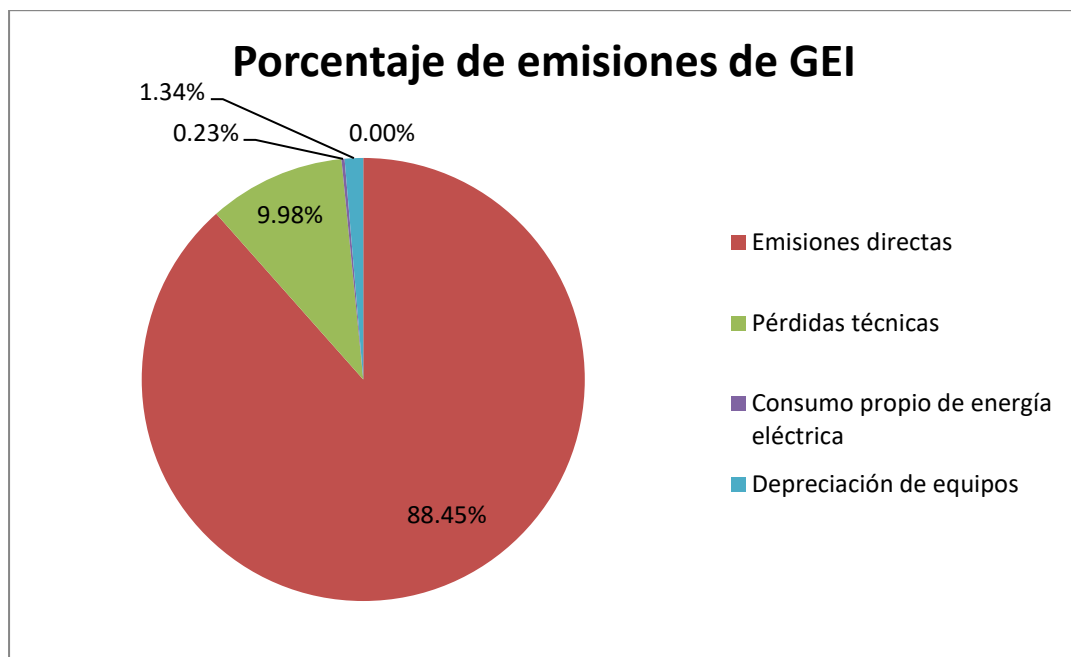


Figura No. 7: Gráfica de emisiones de GEI por producción de energía eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

Las pérdidas indirectas totales representan el 11.55% del total de las emisiones de GEI, siendo el rubro más relevante el de las pérdidas técnicas durante la transmisión y distribución.

Revisión del factor de emisiones totales por el Método Input-Output.

Si se aplica de manera directa el método Input-Output, con la Matriz Inversa de Leontief obtenida de la Matriz Insumo-Producto de la Economía Mexicana del año 2003, se tiene:

Costo de 1 kWh en 2007 = \$1.10/kWh (Martínez, 2009)

Costo de 1 kWh en 2003 = \$0.8485/kWh (Estadísticas del Sector Eléctrico, SENER)

Índice nacional de precios y cotizaciones 2007 = 86.5881

Índice nacional de precios y cotizaciones 2003 = 73.78373

Factor de inflación 2003-2007 = $86.5881/70.96191 = 1.1735$

Costo de 1 kWh en 2003 con base en los datos de Martínez (2007) = \$0.9373/kWh

Se tomará el valor proporcionado por la Secretaría de Energía. Multiplicando este valor, como un vector con ceros en todos sus valores excepto en el correspondiente al sector 9 (Generación de energía eléctrica), a la Matriz Inversa de Leontief de la Economía Mexicana se obtiene un vector de los requerimientos sectoriales de la industria en México para la producción de 1 kWh en 2003. Este resultado se multiplica vectorialmente (producto punto) por el vector de factores de emisión de GEI de los sectores industriales de México para el año 2003, obteniéndose las emisiones de GEI por la producción de 1 kWh.

El resultado de estas operaciones es:

Tomando el costo deducido de Martínez (2009): 0.6737 kg CO₂e/kWh

Tomando el costo proporcionado por la SENER: 0.5186 kg CO₂e/kWh.

Por otra parte el factor de emisiones de GEI reportado por el programa GEIMEXICO es, según su estimación para el año 2010, de 0.4946 kg CO₂e/kWh. Este valor fue calculado con base en el consumo de combustibles fósiles empleados en la producción de electricidad en México por el sector público. El resultado obtenido en este documento es ligeramente superior (19.55 % mayor) al reportado debido a lo siguiente:

- a. Los factores de emisión de GEI por cada tipo de combustible son diferentes, ya que fueron calculados tomando en cuenta las emisiones directas e indirectas involucradas en su producción y transporte.
- b. Se consideraron las emisiones indirectas debidas a la depreciación de equipos, a las pérdidas técnicas y al consumo propio de energía eléctrica.

Se aprecia que la contribución de la depreciación de los equipos a la generación de GEI es pequeña pero relevante (1.34 %), mientras que las emisiones de GEI atribuibles al consumo propio de energía eléctrica representan el 0.23 % de las emisiones totales y su participación no es relevante.

Se considera que el factor de emisiones total calculado en este documento se aproxima más al factor de emisiones real que resultaría en el hipotético caso de poder considerar todas las emisiones del proceso y sus repercusiones, en cuanto a emisiones de GEI, en los sectores de la economía nacional.

El cálculo del factor de emisiones empleando el método Input-Output al no padecer de errores de truncamiento, es en principio completo, sin embargo resulta muy sensible a los costos de la energía eléctrica, que depende a su vez de los costos de

los combustibles fósiles empleados en su producción, que tradicionalmente presentan grandes variaciones por causas tan diversas como las expectativas económicas del mundo, los problemas sociales y políticos en el Medio Oriente, el desarrollo de nuevas tecnologías en energía y el descubrimiento de nuevos yacimientos de petróleo y gas.

Se considera que el factor de emisiones calculado en este documento (0.591291 kg CO₂e/kWh) es el más apropiado para emplearse en los cálculos de emisiones de GEI de los procesos que consuman energía eléctrica de la red nacional mexicana para los efectos de esta tesis.

6.4.3 Aceros.

Unidad Funcional: Un kilogramo de acero terminado y puesto en la obra.

Alcances: Se consideran las emisiones directas por procesos y consumos de combustibles fósiles (Alcance 1), las emisiones indirectas por consumo de energía eléctrica (alcance 2), las emisiones indirectas por los trabajos de mantenimiento, reparación, reconstrucción y/o sustitución (MRR&S) de equipos e instalaciones que se requieren para la producción del acero (Alcance 3). También se tomarán en cuenta las transferencias de CO₂e debidas a la venta de subproductos derivados del proceso de fabricación del acero.

Para determinar el factor de emisiones por la producción de acero se hacen las siguientes consideraciones:

- Se adoptará el factor de emisiones directas calculado a partir de los datos reportados por Arcelor Mittal (Arcelor Mittal México, 2011), ya que incluye en sus cálculos las emisiones directas de todo el proceso de producción. Estas emisiones fueron calculadas con base en factores de emisión por combustibles

que solo consideran las emisiones directas y por lo tanto el valor obtenido es inferior al real, sin embargo este valor no será modificado ya que no se disponen de datos suficientes para obtener los inventarios de ciclo de vida de los diferentes procesos de producción del acero, ni la participación nacional de cada tipo de producción.

- Se considera para el cálculo de las emisiones indirectas atribuibles al consumo de energía eléctrica el Factor de Emisiones Eléctrico calculado ex profeso para esta tesis ($FEE = 0.591291 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh}$).
- Se consideran las emisiones atribuibles a la depreciación de las instalaciones y equipos empleando para ello la Matriz Inversa de Leontief obtenida a partir de la Matriz Insumo-Producto de la economía mexicana del año 2003.

Para la estimación de las emisiones de GEI correspondientes al Alcance 1, se toman los datos reportados por la empresa Arcelor Mittal en 2010 (Arcelor Mittal, 2011). Las emisiones directas de GEI reportadas para el año 2010 por esta empresa fueron de 5'799,890 t CO_2e , siendo la producción de acero terminado para ese mismo año estimado en 3,080,088 t, por lo que el Factor de Emisiones Directas para la producción nacional de acero se estima en:

$$FED = 5'799,890 \text{ t CO}_2\text{e} / 3'080,088 \text{ t acero} = 1.883027 \text{ t CO}_2\text{e} / \text{t acero}.$$

$$FED = 1.883027 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg acero terminado}.$$

Emisiones de GEI correspondientes al Alcance 2, por consumo de energía eléctrica. Se calculan las emisiones que se generan para producir un kilogramo de acero de refuerzo, atribuibles al consumo de energía eléctrica, a partir de las emisiones reportadas por Arcelor Mittal para el año 2010. El procedimiento es el siguiente:

$\text{Emisiones}_{\text{Cons. eléctrico}} = \text{Emisiones}_{\text{Reportadas por consumo eléctrico}} * \text{FEE}_{\text{PROPIO}} / \text{FEE}_{\text{GEIMEXICO}}$.

$\text{Emisiones}_{\text{Consumo eléctrico}} = 1'453,120 \text{ t CO}_2\text{e} * 0.591291 / 0.4946$.

$\text{Emisiones}_{\text{Consumo eléctrico}} = 1'737,195 \text{ t CO}_2\text{e}$

La producción de acero de Arcelor Mittal en 2010 fue de 3'948,831 t, por lo que los factores de emisiones indirectas (FIE) de GEI por consumo de energía eléctrica y por kg de acero producido serían:

$\text{FIE}_{\text{consumo eléctrico}} = 1'737,195 \text{ t CO}_2\text{e} / 3'080,088 \text{ t acero} = 0.564008 \text{ t CO}_2\text{e} / \text{t acero}$.

$\text{FIE}_{\text{consumo eléctrico}} = 0.564008 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg acero}$.

$\text{FIE}_{\text{consumo eléctrico}}$ = Factor indirecto de emisiones por consumo eléctrico.

Las emisiones de Alcance 3 incluyen las emisiones de GEI atribuibles a los trabajos de mantenimiento, reparación, reconstrucción y/o sustitución (MRR&S) de equipos e instalaciones que se requieren para la producción del acero. Para este cálculo se tomará como premisa que los costos de depreciación de los equipos e instalaciones reflejan de manera exacta los costos de MRR&S. Con base en estos costos se calcularán las emisiones de GEI empleando para ello el método Input-Output. Se toma el dato de los costos por depreciaciones del reporte Anual 2006 de la empresa AHMSA, dicho estado contable, sirve de base para los cálculos siguientes.

La producción total de acero líquido del año 2006 de la empresa AHMSA fue de 3.4 millones de toneladas, produciendo 2.946 millones de toneladas de productos de acero terminado.

Por otra parte los costos de depreciación de equipos e instalaciones para el año 2006 fueron aproximadamente de 2,040 millones de pesos (valor del peso mexicano a diciembre de 2006).

La participación al capital de los diversos elementos que se deprecian en esta empresa es la siguiente:

• Edificios:	\$13,317'000,000.00
• Maquinaria y equipo:	\$59,265'000,000.00
• Equipo de transporte:	\$ 344'000,000.00
• Equipo de transporte aéreo:	\$ 618'000,000.00
• Equipo de cómputo:	\$ 607'000,000.00
• Muebles y enseres:	\$ 477'000,000.00
TOTAL:	\$74,628'000,000.00

Las tasas de depreciación para cada rubro son las siguientes:

• Edificios:	2%
• Maquinaria y equipo:	3%
• Equipo de transporte:	16%
• Equipo de transporte aéreo:	16%
• Equipo de cómputo:	13%
• Muebles y enseres:	7%

Los costos de depreciación anual por lo tanto se estiman en:

• Edificios:	\$ 266'340,000.00
• Maquinaria y equipo:	\$1,777'950,000.00
• Equipo de transporte:	\$ 153'920,000.00
• Equipo de cómputo:	\$ 78'910,000.00
• Muebles y enseres:	\$ 33'390,000.00
TOTAL:	\$ 2,310'510,000.00

Los sectores de la economía nacional que corresponden con estos rubros son:

Tabla No. 10: Sectores de la economía que participan en la fabricación de acero.

Número del Sector	Nombre del Sector
11	Edificación
29	Fabricación de maquinaria y equipo
32	Fabricación de equipo de transporte
30	Fabricación de equipo de computación, comunicación, medición y otros equipos, componentes y accesorios electrónicos.
33	Fabricación de muebles y productos relacionados

Para calcular las emisiones totales derivadas de estas actividades se calcularán en primer término los costos equivalentes a pesos del año 2003, para lo cual se emplearán los índices de precios al consumidor de los años 2003 y 2006:

INPC promedio de 2003 = 104.7815

INPC diciembre de 2006 = 121.015

Factor inflacionario = $121.015/104.7815 = 1.154927$

El factor por el que habrá que multiplicar cada costo en diciembre de 2006 será:

$$1/1.154927 = 0.865855$$

Por lo que los costos en cada rubro serán:

- Edificios: \$ 230'611,946.53
 - Maquinaria y equipo: \$ 1,539'447,737.26
 - Equipo de transporte: \$ 133'272,474.32
 - Equipo de cómputo: \$ 68'324,655.33
 - Muebles y enseres: \$ 28'910,914.22
- TOTAL: \$ 2,000'567,727.68

Del análisis Input-output se obtiene como resultado que las emisiones por la depreciación de maquinaria, instalaciones y equipos de la empresa AHMSA en el

año 2006 fue de 137.7749 Gg CO₂e, por lo que el Factor de emisiones indirectas por MRR&S (FEI_{MRR&S}) se estima en:

$$FEI_{MRR\&S} = 137.774904 * 10^9 \text{ g CO}_2\text{e} / 2.946 * 10^{12} \text{ g de acero terminado.}$$

$$FEI_{MRR\&S} = 0.04676677 \text{ g CO}_2\text{e/g acero terminado.}$$

$$FEI_{MRR\&S} = 0.04676677 \text{ kg CO}_2\text{e/ kg acero terminado.}$$

Además de la producción de acero durante el proceso productivo se obtienen subproductos a los cuales les corresponde atribuirse una parte de las emisiones de GEI. La empresa Arcelor Mittal reportó para el 2010 (Arcelor Mittal, 2011) una transferencia de emisiones de CO₂e de 359,390 t CO₂e. Esta transferencia de emisiones es debida a la venta de subproductos (alquitrán, benzol y escorias) por lo que el factor de emisiones por la transferencia de estas emisiones es igual a:

$$FE_{TRANSFERENCIA} = - 359,390'000,000 \text{ t CO}_2\text{e} / 2.946 * 10^{12} \text{ g de acero terminado.}$$

$$FE_{TRANSFERENCIA} = - 0.121992 \text{ g CO}_2\text{e/ g acero terminado.}$$

$$FE_{TRANSFERENCIA} = - 0.121992 \text{ kg CO}_2\text{e/ kg acero terminado.}$$

El factor de emisiones totales (FET) será la suma de los factores de emisiones de GEI directo e indirectos.

$$FET_{fabrica} = 2.37181 \text{ kg CO}_2\text{e/ kg acero terminado.}$$

Este resultado refleja las emisiones de GEI desde el inicio del proceso hasta la puerta de la fábrica. A estas emisiones se deben sumar las emisiones debidas al transporte de la fábrica a la obra. Para estimar las emisiones de GEI debidas al transporte del acero desde las fábricas hasta la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas se empleará el factor de emisiones por el transporte de mercancías propuesto por la

North America's Railroad¹⁵ . Este factor es de 0.114 kgCO₂e/t-km y corresponde al transporte de mercancías en camiones pesados. Los camiones que usualmente circulan por nuestras carreteras tienen una capacidad máxima de 50 t, por lo que considerando una carga promedio de 25 t (considerando el viaje vacío de regreso) se tendría un factor de 2.85 kg CO₂e/km.

Las principales marcas de varilla en el mercado local de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas son: HYLSA, SICARTSA y DeAcero. Las distancias de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a las siderúrgicas principales del país, se obtienen a partir de la consulta de rutas disponible en línea¹⁶ por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla No. 11: Distancias de siderúrgicas a Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Siderúrgica	Distancia a Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (km)	Costo de casetas (pesos)
Ternium (Siderúrgica de Monterrey)	1772	4941
Ternium (Siderúrgica de Puebla)	716	2442
Arcelor Mittal (Siderúrgica Las Truchas en Lázaro Cárdenas, Michoacán)	1446	5572
DeAcero (Siderúrgica ubicada en Celaya, Guanajuato)	1090	4415
PROMEDIOS	1256	4342.5

Las emisiones de GEI por el transporte de las varillas a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas es en promedio:

$$FIE_{\text{TRANSPORTE}} = 1256 \text{ km} * 2 * 2.85 \text{ kg CO}_2\text{e/km} / 50,000 \text{ kg acero terminado}$$

$$FIE_{\text{TRANSPORTE}} = 0.143184 \text{ kg CO}_2\text{e/kg acero terminado.}$$

¹⁵ Consultado en <http://www.cn.ca/en/greenhouse-gas-calculator-emission-factors.htm>, el 11 de febrero de 2012

¹⁶ http://aplicaciones4.sct.gob.mx/sibuac_internet/ControllerUI?action=cmdSolRutas.

Factor Indirecto de Emisiones por Transporte = $FIE_{TRANSPORTE}$

Por otra parte el costo de casetas (\$3,008.84 pesos M.N. a precios del 2003) refleja el gasto que se invierte en la construcción y conservación de carreteras. Estas actividades implican emisiones que se pueden estimar aplicando el método Input-Output. Aplicando los costos de casetas al sector de construcción pesada se obtienen emisiones de 200.34 kg CO₂e. Las emisiones por unidad funcional son:

$FE_{C\&C \text{ de Carreteras}} = 200.34 \text{ kg CO}_2\text{e}/50,000 \text{ kg acero terminado.}$

$FE_{C\&C \text{ de Carreteras}} = 0.0040068 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg acero terminado.}$

$FE_{C\&C \text{ de Carreteras.}} = \text{Factor de Emisiones por C\&C de Carreteras.}$

Factor de emisiones totales por transporte del acero a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas:

$FIET_{TRANSPORTE} = 0.143184 + 0.0040068 = 0.147191 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{kg acero terminado.}$

La suma de las emisiones totales por fabricación del acero más las emisiones por el transporte del acero a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas nos da como resultado el factor de emisión atribuible al acero de refuerzo que se emplea en las construcciones que emplean concreto reforzado en esta ciudad. Este factor es el siguiente:

$FET_{obra} = 2.37181 + 0.14719 = 2.519 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{kg acero terminado.}$

6.4.4 Cementos.

Unidad Funcional: Un kilogramo de cemento gris Portland Tipo I puesto en el sitio de la obra.

Alcances: Se consideran los alcances 1, 2 y 3.

Las emisiones de GEI correspondientes al Alcance 1 consideran la combustión de combustibles fósiles y la calcinación de la caliza. Las emisiones por combustión de

combustibles fósiles se estiman a partir del reporte de consumos de combustibles fósiles de la empresa Cruz Azul para el año 2006 (www.geimexico.mx):

Combustóleo: 346'314,863 lts
 Gas natural: 48'771,223 m³
 Diesel: 2'513,106 lts
 Gasolina: 774,065 lts

Por otra parte la producción de clinker para ese mismo año fue de: 4'107,485 t, por lo que considerando que para el cemento portland la proporción de clinker en el cemento es de 0.95, tendríamos que la producción asociada de cemento fue de 4'323,668 t.

Los factores de emisión para los distintos combustibles son:

Tabla No. 12: Factores de emisiones de GEI de combustibles.

Combustible	Factor de emisión	Fuente
Combustóleo	3.501 kg CO ₂ e/lit	Elaboración propia
Gas natural	2.472 kg CO ₂ e/m ³	Johnson et al (2009)
Gasolina	2.863 kg CO ₂ e/lit	Elaboración propia
Diesel	3.185 kg CO ₂ e/lit	Elaboración propia

Las emisiones por consumo de combustibles fósiles, para la fabricación de una tonelada de cemento, se estiman a partir de estos datos efectuándose los cálculos en la tabla siguiente:

Tabla No. 13: Emisiones de GEI por combustión por tonelada de cemento.

Combustible	Cantidad	Unidad	Factor de emisión	Emisiones de GEI (kg CO ₂ e)
Combustóleo	80.097	l	3.501 kg CO ₂ e/lit	280.420
Gas natural	11.280	m ³	2.472 kg CO ₂ e/m ³	27.884
Diesel	0.581	l	3.185 kg CO ₂ e/lit	1.850
Gasolina	0.179	l	2.863 kg CO ₂ e/lit	0.512

Suma: 310.666 kg CO₂e /t cemento

La calcinación de la caliza provoca una reacción química en la que se libera CO₂. Siguiendo los cálculos presentados por el IPCC (2006) para el cálculo del factor de emisión de GEI en la producción del cemento, según el método del Nivel 1, una tonelada de clinker contiene 65% de CaO proveniente del carbonato de calcio CaCO₃, este carbonato tiene el 56.03% de CaO y el 43.97% de CO₂, por lo que para producir una tonelada de clinker se requiere de la siguiente cantidad de carbonato de calcio:

$$0.65/0.5603 = 1.160093 \text{ ton.}$$

El CO₂ emitido en el proceso de producción de una tonelada de clinker sería:

$$1.160093 \text{ t} * 0.4397 = 0.510093 \text{ ton CO}_2\text{e/t clinker.}$$

A estas emisiones de GEI se les debe aplicar un factor de corrección debido a las pérdidas de clinker en forma de polvo durante el proceso. Este factor se puede estimar como 1.02 (IPCC, 2006), por lo que las emisiones por la producción de clinker serían:

$$0.510093 \text{ t CO}_2\text{e/t clinker} * 1.02 = 0.52029486 \text{ t CO}_2\text{e/t clinker.}$$

Estimando un contenido de 95% de clinker por tonelada de cemento, se tendría un factor de emisión de GEI por el proceso de calcinación del clinker por tonelada de cemento de:

$$0.5203 \text{ t CO}_2\text{e/t clinker} * 0.95 \text{ t clinker/t cemento} = 0.49428 \text{ t CO}_2\text{e/t cemento.}$$

Las emisiones de GEI correspondientes al Alcance 1 son por lo tanto:

$$\text{FED} = 0.310666 \text{ kg CO}_2\text{e /kg cemento} + 0.49428 \text{ kg CO}_2\text{e/kg cement}$$

$$\text{FED} = 0.804946 \text{ kg CO}_2\text{e /kg cement.}$$

Las emisiones de GEI correspondientes al Alcance 2, por consumo de energía eléctrica, de acuerdo al Reporte de Inventario de Emisiones de GEI de la empresa Cruz Azul, son:

Consumo de energía eléctrica = 553'603,435 kWh

Consumo de energía eléctrica por tonelada de cemento producido:

$553'603,435 \text{ kWh} / 4'323,668 \text{ ton} = 128.04 \text{ kWh/t}$

Emisiones por consumo de energía eléctrica: $128.04 \text{ kWh/t} * 0.591291 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh}$
 $= 75.708929 \text{ kg CO}_2\text{e/t} = 0.075708929 \text{ kg CO}_2\text{e/kg cemento.}$

Las emisiones correspondientes al Alcance 3 toman en cuenta la depreciación de instalaciones y equipos. Para esta estimación se toman datos del balance contable de la empresa Cementos Apasco, la cual reportó un cálculo de depreciaciones para el año 2004, por \$859'105,000.00, de un total de ventas esperadas de ese año de \$11,688'965,000.00 (Holcim Apasco, 2010). Las depreciaciones representan el 7.3505% del costo de las ventas.

El costo de un saco de cemento de 50 kg en el año 2010 era de \$120.00, considerando un factor inflacionario 2003-2010 (Supertabla Bicentenario), calculado con base en el Índice Nacional de Precios y Cotizaciones (INPC) se tendría:

INPC 2003:	73.78373
INPC 2010:	99.74209
Factor inflacionario 2003-2010:	1.351815

El precio del saco de 50 kg de cemento en el año 2003 se estima en:

$\$120.00 / 1.351815 = \88.77

El precio de un kilogramo de cemento en 2003 era de: $\$88.77 / 50 \text{ kg} = \$1.774/\text{kg}$

La fracción de este costo correspondiente a la depreciación de la maquinaria y equipo sería:

Costo de depreciación = $\$1.774 \times 0.0735 = \$0.1304/\text{kg}$ cemento (pesos 2003)

Aplicando este valor al sector de Maquinaria y Equipo dentro del vector de Insumos (con el resto de valores nulos) a la Matriz Inversa de Leontief de la Economía Mexicana del año 2003, se tendría el siguiente resultado:

Factor de emisión de GEI = $0.06439522 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{peso 2003}$.

Emissiones por depreciación de maquinaria y equipo: $0.06439522 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{peso 2003}$

* $\$0.1304/\text{kg}$ cemento = $0.00839714 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{kg}$ cemento.

Emisiones totales hasta la puerta de la fábrica:

Por calcinación de la caliza: $0.494280 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{kg}$ cemento

Por consumo de combustibles fósiles: $0.310666 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{kg}$ cemento

Por consumo de energía eléctrica: $0.075709 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{kg}$ cemento

Por depreciación de maquinaria y equipos: $0.008397 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{kg}$ cemento

Factor de emisión hasta la puerta de la fábrica: $0.889052 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{kg}$ cemento.

Las emisiones de GEI por transporte del cemento de la fábrica a la obra se estiman considerando que existen dos plantas cementeras que proveen, por su cercanía, la mayoría del cemento que se comercializa en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Una de ellas es la planta cementera Cruz Azul de Lagunas, Oaxaca, existiendo una distancia aproximada a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas de 480 km. La otra planta cementera que abastece a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas es la planta cementera Holcim Apasco de Tabasco (Planta Macuspana), la distancia desde esta planta hasta la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas es de aproximadamente 358 km.

Considerando una participación igual de ambas cementeras, la distancia promedio de acarreo del cemento sería de: 419 km.

Los camiones que transportan el cemento son diversos, el camión más grande que circula por las carreteras mexicanas tiene una configuración conocida como T3-S2-R4 que corresponde a un tráiler compuesto de un tractor, un semirremolque y un remolque. Este camión tiene una capacidad máxima de carga de aproximadamente 70 toneladas, para efectos de cálculo se supondrá un transporte de 50 toneladas de cemento por viaje.

El Departamento del Transporte de los Estados Unidos reporta (2005) un factor de emisiones de GEI para los camiones pesados que consumen diesel de 3,314 g CO₂e/mi, esto equivale a 2.060 kg CO₂e/km.

El factor de emisiones de GEI por km recorrido en este tipo de camiones es de 0.90535 kg CO₂e/km (Oficina Catalana de Cambio Climático, 2011).

De acuerdo con North America's Railroad¹⁷ el factor de emisiones por el transporte de mercancías en camiones pesados es de 0.114 kgCO₂e/t-km, considerando una carga promedio de 25 t (considerando el viaje vacío de regreso) se tendría un factor de 2.85 kg CO₂e/km.

Se tomará este factor para los cálculos subsecuentes, ya que considera el peso del camión. Se supone que el camión viaja cargado de la planta cementera a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas y viaja descargado de regreso a la planta cementera, por lo que la distancia total recorrida para llevar 50,000 kg de cemento a Tuxtla Gutiérrez es de 838 km. El peso propio del camión se estima en 10 t, mientras que la

¹⁷ Consultado en <http://www.cn.ca/en/greenhouse-gas-calculator-emission-factors.htm>, el 11 de febrero de 2012.

carga que transporta es de 50 t, por lo que el peso total del camión durante el viaje de ida (cargado) sería de 60 t y las emisiones de GEI por kg de cemento durante esta etapa del viaje serían:

Emisiones de GEI por kg de cemento en el viaje de ida = $0.114 \text{ kg CO}_2\text{e/t-km} * 60 \text{ t} * 419 \text{ km}/50\ 000 \text{ kg cemento} = 0.0573192 \text{ kg CO}_2\text{e/kg cemento}$.

Emisiones de GEI durante el viaje de regreso, con el camión ya descargado, por kg de cemento = $0.114 \text{ kg CO}_2\text{e/t-km} * 10 \text{ t} * 419 \text{ km}/50\ 000 \text{ kg cemento} = 0.0095532 \text{ kg CO}_2\text{e/kg cemento}$.

Emisiones de GEI por transporte de un kg de cemento a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas = $0.0573192 + 0.0095532 = 0.0668724 \text{ kg CO}_2\text{e/kg cemento}$.

Las emisiones de GEI totales por unidad funcional serán entonces:

Factor de emisión hasta la puerta de la fábrica: $0.889052 \text{ kg CO}_2\text{e/kg cemento}$

Factor de emisiones por transporte: $0.066872 \text{ kg CO}_2\text{e/kg cemento}$

Factor de Emisiones Totales: $0.955924 \text{ kg CO}_2\text{e/kg cemento}$.

No se consideran las emisiones por construcción y conservación de carreteras debido a que como se observó en el caso del análisis de las emisiones por el transporte del acero, este rubro no es relevante.

6.4.5 Arena de río.

Unidad Funcional: Un metro cúbico de arena de río, limpia y puesta en el sitio de la obra en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Alcances: Se consideran los alcances 1, 2 y 3.

Para el análisis del ciclo de vida de la arena de río se analiza la extracción efectuada por la empresa Arrendadora de Maquinaria y Comercializadora S.A. de C.V. que se dedica al arrendamiento de maquinaria pesada y a la extracción, cribado, transporte

y comercialización de la arena de río. El banco de arena se ubica en la margen derecha del río Santo Domingo. A este banco se accede a través de la carretera que va del entronque carretero (Tuxtla Gutiérrez – Chiapa de Corzo) a Revolución Mexicana, ubicándose el banco en cuestión en la Ribera La Unión.

Para la extracción de la arena se dispone de una península por la que transitan los vehículos de carga y la maquinaria, extrayéndose la arena por medio de una draga LS-118 (Potencia = 130 hp) con bote de arrastre de 1 m³. Cuando la draga se encuentra en reparación o mantenimiento, la extracción se efectúa con otra draga o incluso con una excavadora. El material extraído es apilado en la misma operación de extracción. El material apilado es cribado por medio de una criba de 1/2" que se carga con un cargador frontal Payloader Caterpillar IT-38G formando una nueva pila de arena limpia. La carga de la arena la efectúa el mismo cargador IT-38G, empleando para el acarreo diversos camiones que van desde 6 m³ de capacidad hasta 40 m³ de capacidad. Los camiones de carga más comunes son de 7m³ de capacidad.

Para estimar las emisiones de GEI por cada unidad funcional, se tomaron registros de consumos de combustibles de las máquinas empleadas en la extracción y cribado de la arena (incluyendo el equipo de apoyo logístico). Estos registros tienen una periodicidad semanal y para el estudio se analizaron cinco semanas registrando a la vez la producción de arena en el mismo período.

Para los efectos de determinar las emisiones horarias de los equipos empleados se estimaron las horas trabajadas por cada equipo empleando el valor de consumo específico del uso medio calculado a partir de los datos proporcionados por Caterpillar ($C_e = 0.1093750$ l/h-hp).

Para el cálculo de los tiempos en horas equivalentes que cada máquina trabajó en el período analizado, se obtuvieron los rendimientos de combustible de aquellas máquinas de los que no se disponían de datos del fabricante, multiplicando el parámetro del consumo específico por la potencia nominal de los equipos. Conocidos los consumos horarios de combustibles se determinan las horas trabajadas por cada máquina dividiendo los consumos medidos en el período analizado entre los consumos horarios respectivos.

Se calcularon las emisiones por cada hora trabajada por máquina, considerando las emisiones de GEI por la quema directa de combustibles fósiles, más las emisiones indirectas por depreciación y mantenimiento de cada máquina.

Para estimar las emisiones de GEI por el transporte de la arena se calcularon las emisiones horarias de GEI de un camión de volteo de 7 m³ y con base en la distancia de acarreo y en una velocidad supuesta se estiman las emisiones de GEI por este concepto.

Se calcularon las emisiones totales de GEI en el período sumando los productos de las horas trabajadas por cada máquina por las horas trabajadas por las mismas. A estas emisiones se suman las debidas al transporte de la arena para así obtener las emisiones totales de GEI en el período analizado. Finalmente se dividieron las emisiones totales de GEI entre la producción del período analizado obteniendo el factor de emisiones de GEI por la extracción y transporte de la arena de río a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

El resumen de los registros semanales de consumos de combustibles durante las operaciones de extracción y cribado es el siguiente:

Período analizado: Del 28 de noviembre de 2011 al 31 de diciembre de 2011.

Tabla No. 14: Consumo semanal de combustibles en la extracción de arena de río.

Máquina	Consumo de combustibles (l)	Tipo de combustible
Draga LS-118	1048.16	Diesel
Excavadora 320 BL	1036.08	Diesel
Cargador Frontal / Payloader	1756.08	Diesel
Camioneta Pick Up Nissan	916.28	Gasolina
Planta de soldar Lincoln K1277	37.81	Diesel

Estimación de las horas trabajadas por máquina:

Tabla No. 15: Cálculo de las horas trabajadas por cada máquina en la extracción de arena de río.

Máquina	Consumo de combustibles (l)	Rendimiento teórico (l/hr)	Horas trabajadas
Draga LS-118 (130 hp)	1,048.16	14.22*	73.71
Excavadora 320 BL (128 hp)	1,036.08	14.00*	74.01
Cargador Frontal / Payloader (160 hp)	1,756.08	17.50*	100.35
Camioneta Pick Up Nissan (143 hp)	916.28	8.00**	114.54
Planta de soldar Lincoln K1277 (60 hp)	37.81	6.56*	5.76

*Calculados con base en el consumo específico $C_e = 0.109375$ l/hp-h

**Calculado sobre la base de una velocidad promedio de 80 km/h y un rendimiento de 10 km/l.

Emisiones de GEI por la actividad de los equipos en el período considerado:

Tabla No. 16: Emisiones de GEI por semana en la extracción de arena de río.

Máquina	Horas trabajadas	Emisiones horarias de GEI (kg CO ₂ e/h)	Emisiones de GEI (kg CO ₂ e)
Draga LS-118 (130 hp)	73.71	52.3195	3,856.47
Excavadora 320 BL (128 HP)	74.01	51.4055	3,804.52
Cargador Frontal / Payloader (160 HP)	100.35	63.1388	6,335.98
Camioneta Pick Up Nissan	114.54	23.3176	2,670.80
Planta de soldar Lincoln K1277 (60 hp)	5.76	21.4920	123.79

Total de emisiones por extracción y cribado: 16,791.56 kg CO₂e

El volumen de arena extraído, cribado y acarreado en el período analizado fue de 4,767 m³, por lo que las emisiones por la extracción y cribado por m³ de arena fueron:

Factor de emisiones por extracción y cribado = $16,791.56 \text{ kg CO}_2\text{e}/4,767 \text{ m}^3$

Factor de emisiones por extracción y cribado = $3.522 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3$.

Las distancias de los bancos de arena a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez varían, por lo que se considera una distancia promedio a los bancos de arena de 28 km.

En un ciclo completo de carga y descarga el camión recorre 56 km suponiendo una velocidad media de 60 km/h, el tiempo de recorrido en el ciclo será:

Tiempo de recorrido = $56 \text{ km}/(60\text{km/h}) = 0.9333 \text{ h}$.

A este tiempo se le deberá incrementar el tiempo de descarga que se estima en 0.0833 h, por lo que el tiempo total del ciclo será:

Tiempo total de un ciclo = $0.9333 \text{ h} + 0.0833 \text{ h} = 1.0166 \text{ h}$.

El factor de emisiones horarias para un camión de volteo de 7 m^3 es:

FEH Volteo Mercedes Benz $7\text{m}^3 = 57.0549 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{h}$

Por lo que las emisiones por el acarreo de 7m^3 de arena limpia a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas serían:

Emisiones por acarreo = $57.0549 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{h} * 1.0166 \text{ h} = 58.00 \text{ kg CO}_2\text{e}$.

Factor de emisiones por acarreo = $8.286 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3$.

Los factores de emisión obtenidos son:

Factor de emisiones de GEI por extracción y cribado = $3.522 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3$

Factor de emisiones de GEI por transporte = $8.286 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3$

Factor total de emisiones de GEI = $11.808 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3$

6.4.6 Grava triturada de $\frac{3}{4}$ ".

Unidad Funcional: Un metro cúbico de grava triturada de $\frac{3}{4}$ " limpia y puesta en el sitio de la obra.

Alcances: Se consideran los alcances 1, 2 y 3.

Para el análisis del ciclo de vida de la grava triturada se analizó la producción de la planta de trituración que se ubica en la Col. Plan Chiapas, en el municipio de Chiapa de Corzo, en los límites con el municipio de Tuxtla Gutiérrez. Esta planta de producción se ubica a dos kilómetros (desviación izquierda) del km 8 de la carretera Tuxtla Gutiérrez – Chiapa de Corzo.

Se elaboró el inventario de materiales y equipos que se emplean durante el ciclo de vida de la grava triturada, desde la extracción de la roca hasta el transporte a la obra. Los consumos de energéticos fueron calculados con base en rendimientos estandarizados de los equipos y maquinaria.

De manera simplificada el proceso de producción de la grava triturada de ¾" es el siguiente:

Extracción. Se extrae la roca caliza en greña de un banco ubicado a 700 m de la trituradora, para extraer el material el primer paso consiste en barrenar un frente de 20 metros con una doble fila de barrenos en tresbolillo ubicados a 2 m unos de otros, con una profundidad de 10 m cada barreno y un diámetro de 3". Una vez limpiados los barrenos se procede a introducir una carga explosiva de nitrato de amonio y diesel (ANFO) tipo Dinomax Pro o similar de 5.0 cm de diámetro y 40 cm de longitud dejando instalada el primacord, posteriormente se coloca un material de relleno granular para cebar, tipo Anfoasturion o similar y se termina de rellenar el barreno con tierra del lugar. Se conectan todos los cordones Primacord colocando retardadores para que exploten primero los barrenos del frente y luego los traseros, evitado de esa forma que vuelen las rocas demasiado lejos y facilitando el proceso de la voladura. Según Bascetin et al (2011) Las emisiones de GEI por los gases que resultan de la explosión son de valor despreciable (0.0000029 kg CO_{2e}/m³) en

comparación con los que resultan del consumo de combustibles, por lo que no se tomarán en cuenta. Una vez que se vuela la roca, se generan aproximadamente 800 m³ de material compacto (medido en banco) equivalentes a 1000 m³ de material abundado. Para barrenar la roca se emplea un Track Drill alimentado por un compresor Ingersoll Rand 750 CFM con 210 HP de potencia, (capacidad del carter: 20 lts de aceite; motor de 6 cilindros en V con un desplazamiento del motor por cilindro de 1200 cm³). Este equipo de trabajo tiene un rendimiento real aproximado de 3 barrenos de 10 m por turno de 8 horas nominales (7 horas reales). El consumo estimado en campo es de 100 litros de diesel por turno.

Carga en el banco. El material producto de la voladura es movido por un tractor CAT D8T de 310 HP (231 KW) de potencia¹⁸ y cargado a los camiones “fuera de carretera” por un cargador frontal 988B de 375 HP de potencia. El tractor emplea prácticamente medio turno para su trabajo, mientras que el cargador frontal trabaja el turno completo. El rendimiento de este equipo es de aproximadamente 200 m³ por turno de 8 horas nominales.

Acarreo del banco a la trituradora. El acarreo se efectúa con camiones fuera de carretera (Yuckles) modelo 769D de 17 m³ de capacidad en volumen, 36.4 toneladas de capacidad de carga y 518 HP de potencia bruta. El recorrido es de aproximadamente 0.7 km de ida (cargado y en subida) y la misma distancia de regreso ya descargado. El tiempo del ciclo es de aproximadamente 20 minutos, incluyendo los tiempos de carga y descarga.

¹⁸ Catálogo de maquinaria y especificaciones consultado el 16 de noviembre de 2011 en <http://mexico.cat.com/cda/layout?m=237282&x=9>.

Trituración. Todo el equipo de trituración y movimiento de bandas es eléctrico y es alimentado por un generador que consume diesel, generando corriente de 440 volts, que es dividida en líneas de 220 volts para alimentar el equipo. El proceso de trituración inicia con una trituradora primaria de quijada de 36" x 42" (150 hp) que produce material graduado de 4" a 1/4" y un material residual de 1/4" a 0", la proporción de material aprovechable para la producción de grava de 3/4" a 1/4" es del 80%. El material resultante de 4" a 1/4" se mueve por bandas hasta una trituradora secundaria de cono ajustable (100 hp), que se ajusta para la producción del agregado que uno desee obtener. Del paso por esta trituradora se obtiene la grava de 3/4" a 0", debiendo pasar por un último cribado (100 hp) para obtener la grava ya limpia (3/4" a 1/4") de este proceso se obtiene un 80% de grava limpia, siendo el restante 20% polvo de trituración. El consumo de diesel en un turno nominal de 8 horas del generador de energía eléctrica que mueve a las trituradoras y a las bandas es de aproximadamente 1200 litros de diesel.

Carga en la trituradora. Para la carga en la trituradora se emplea un cargador frontal de orugas C3.4 DIT de 90 HP de potencia bruta y con capacidad de carga de 1500 kg. Este cargador llena un camión de 7 m³ en 5 operaciones de carga, tomándole aproximadamente 5 minutos por carga de un camión; este mismo equipo se emplea para acomodar el material producto de la trituración para su posterior carga.

Acarreo de la trituradora al sitio de la obra. Para este acarreo se emplean camiones de 7 m³, cuya marca y modelo varían, pero que en general son muy similares. Para efectos de cálculo se considerará un camión marca Mercedes Benz 1617/34 de 170 hp de potencia. La distancia de acarreo se considerará desde la

planta de producción hasta el centro de la ciudad, despreciando las variaciones de las distancias a cada sitio de obra. Esta distancia es de aproximadamente 12 km, siendo la velocidad media de recorrido de 30 km/h, el tiempo del ciclo de acarreo de un camión es de 0.8 hr. El número de horas-camión necesarios para mover los 200 m³ de producción diaria es de 23.2 h-camión.

Cálculo de emisiones de CO₂e.

Para el cálculo de las emisiones de CO₂e por el consumo de diesel, llantas, aceites y por la depreciación de los equipos, se calcularon las emisiones horarias de los equipos empleados en el proceso, calculando las emisiones por turno de trabajo como la sumatoria de los productos de las emisiones horarias por las horas que trabaja cada máquina en el turno. .

Tabla No. 17: Emisiones de GEI por turno de producción de grava triturada de ¾”.

Proceso	Equipo	Emisiones horarias kg CO₂e/h	Horas por turno	Emisiones kg CO₂e/turno
Extracción	Track Drill con un Compresor 750 cpm	82.1376	7	574.9632
Carga en banco	Tractor CAT D8T	105.3392	4	421.3568
	Cargador Frontal 988B	164.3613	4	657.4452
Acarreo	Camión 769 D	113.2254	4	452.9016
Trituración	Trituradora de quijada	6.2844	7	43.9908
	Trituradora de cono	5.5063	7	38.544 1
	Torre de cribado	5.1809	7	36.266 3
	Generador de energía eléctrica	194.2969	7	1360.0 720
Carga en trituradora	Cargador frontal C3.4 DIT	25.4210	5	127.1050
Acarreo a obra	Camión Volteo 7 m ³	57.0549	23.2	1323.6737

Suma de emisiones por turno: 5,036.3187 kg CO₂e/turno.

Producción por turno = 200 m³: 72 m³ de polvo de trituración (1/4” a 0”) más 128 m³ de grava limpia (3/4” a 0”).

Emisiones por 0.64 m³ de grava triturada limpia de ¾" más 0.36 m³ de polvo de trituración, considerando todo el proceso: 25.1816 kg CO₂e/m³.

Cálculo de factores de asignación económica.

Costo de la grava triturada de ¾" en la obra¹⁹: \$213.00/m³

Costo del polvo de trituración puesto en la obra: \$100.00/m³

Producción de grava triturada por m³ de roca de insumo: 0.64 m³

Producción de polvo de trituración por m³ de roca de insumo: 0.36 m³

Costo de la grava producida: 0.64 m³ * \$230.00/m³ = \$147.20

Costo del polvo producido: 0.36 m³ * \$100.00/m³ = \$ 36.00

Costo total producido: = \$183.20

Factor de asignación de emisiones de la grava triturada: 147.20/183.20= 0.8035

Factor de asignación de emisiones del polvo de trituración: 36/183.20 = 0.1965

Emisiones por la fabricación de 1 m³ de grava triturada:

= 25.1816 kg CO₂e/m³ roca * 0.8035 / (0.64 m³ grava/m³ roca)

= 31.6147 kg CO₂e/m³ grava triturada de ¾"

Emisiones por la fabricación de 1 m³ de polvo de roca:

= 25.1816 kg CO₂e/m³ roca * 0.1965 / (0.36 m³ grava/m³ roca)

= 13.7450 kg CO₂e/m³ polvo de roca.

¹⁹ Costos de materiales tomados de la base de datos del programa NEODATA versión 2011.

Tabla No. 18: Emisiones de GEI por m³ de grava triturada de ¾".

Proceso	Equipo	Emisiones kg CO ₂ e/m ³	Porcentaje de participación
Extracción	Track Drill con un Compresor 750 cpm	3.609241	11.416%
Carga en banco	Tractor CAT D8T	2.645001	21.420%
	Cargador Frontal 988B	4.127009	
Acarreo	Camión 769 D	2.843019	8.993%
Trituración	Trituradora de quijada	0.276145	29.364%
	Trituradora de cono	0.241955	
	Torre de cribado	0.227656	
	Generador de energía eléctrica	8.537638	
Carga en trituradora	Cargador frontal C3.4 DIT	0.797882	2.524%
Acarreo a obra	Camión Volteo 7 m ³	8.309154	26.283%
Suma de emisiones de CO ₂ e/m ³ :		31.614700	100.00%

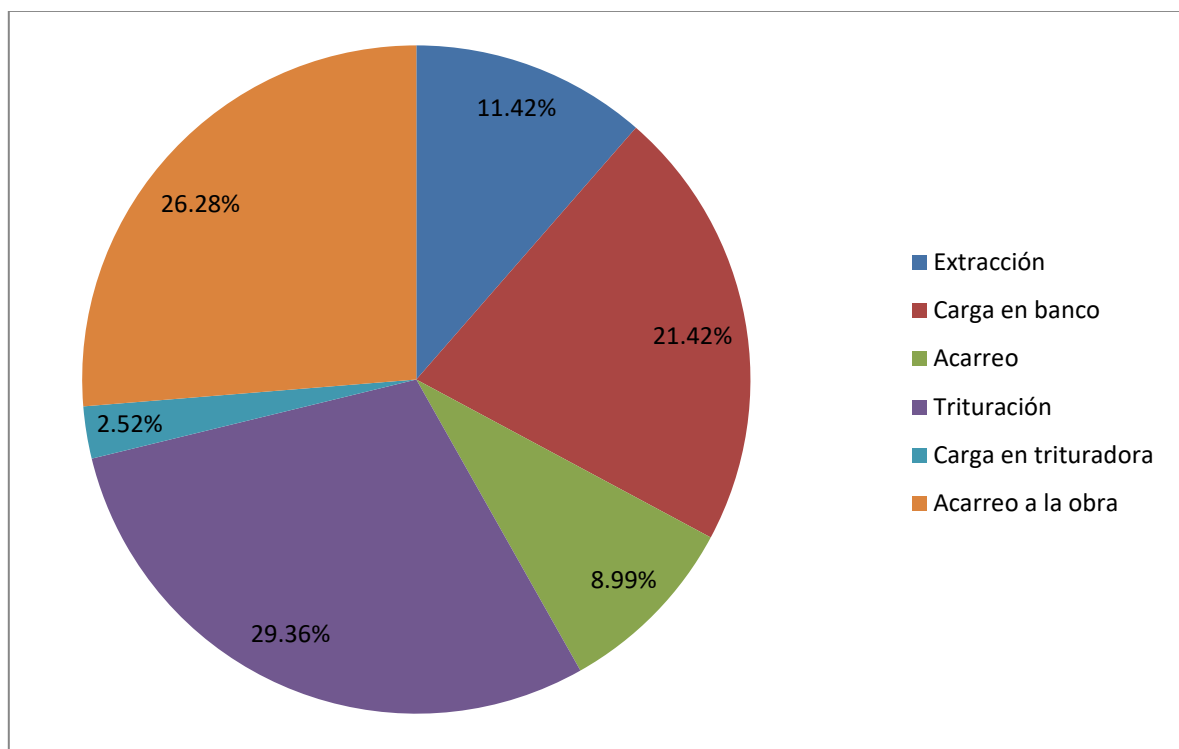


Figura No. 8: Emisiones de GEI por la producción de grava triturada de ¾".

En conclusión, las emisiones de GEI por la fabricación y transporte de un metro cúbico de grava triturada de ¾" en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, se estima en 31.6147 kg CO₂e/m³.

6.4.7 Concretos premezclados.

Unidad Funcional: Un metro cúbico de concreto premezclado puesto en la obra.

Se consideran las resistencias nominales que se emplean en las obras en estudio:

f'c = 100 kg/cm², 150 kg/cm², 200 kg/cm² y 250 kg/cm².

Alcances: Se consideran los Alcances 1, 2 y 3.

Se calculan los inventarios de materiales y equipos partiendo de la estimación de las proporciones de los materiales requeridos para alcanzar las resistencias nominales de los concretos en estudio. Una estimación de las proporciones de los concretos se puede hacer a partir de los parámetros de variación de las resistencias en función de los procedimientos de fabricación. La fórmula que presentan González y Robles (2006) permite hacer este cálculo:

$$fp = \frac{f'c}{1 - tV}$$

Donde:

fp = Resistencia promedio necesaria.

f'c = Resistencia nominal especificada.

t = Constante que depende del porcentaje de datos que pueden ser menores que el valor especificado y del número de muestras necesarias para establecer el coeficiente de variación V.

V = Coeficiente de variación previsto según el grado de control, expresado en forma decimal. El coeficiente de variación es igual a la desviación estándar (σ) entre la media (μ): $V = \sigma/\mu$.

Los valores que puede tomar V son:

Tabla No. 19: Coeficientes de variación de resistencias en concretos.

Condiciones de mezclado y colocación	Control	Coeficiente de variación V
Agregados secos, granulometría precisa, relación exacta agua/cemento, temperatura controlada de curado y supervisión continua.	De laboratorio	5 – 6
Pesado de todos los materiales, control de la granulometría y del agua, tomando en cuenta la humedad de los agregados en el peso de la grava y la arena y en la cantidad de agua. Supervisión continua.	Excelente	7-9
Pesado de todos los materiales, control de la granulometría y calidad de los agregados. Supervisión continua.	Alto	10-12
Pesado de los agregados, control de la granulometría y del agua. Supervisión frecuente.	Muy Bueno	13-15
Pesado de los materiales. Contenido de agua verificado a menudo. Verificación de la trabajabilidad. Supervisión intermitente.	Bueno	16-18
Proporción por volumen, considerando el cambio de volumen de la arena por humedad. Cemento pesado. Contenido de agua verificado en la mezcla. Supervisión intermitente.	Regular	20
Proporción por volumen de todos los materiales. Poca o ninguna supervisión.	Pobre	25

Fuente: González y Robles (2006)

Es razonable suponer que las condiciones previstas por los fabricantes para la fabricación de mezclas en el lugar por cualesquiera personal, corresponden al último caso con un coeficiente de variación $V = 25\%$. Por otra parte las condiciones de fabricación de los concretos premezclados corresponden al segundo caso con un coeficiente promedio de variación $V = 8\%$.

El parámetro t se obtiene a partir de la distribución normal de probabilidades, asumiendo que al menos el 95% de las muestras tengan una resistencia igual o mayor a la nominal, t sería igual a 1.64.

Las resistencias nominales del concreto versus el promedio del contenido de cemento sugerido por los fabricantes por metro cúbico de concreto se presenta en la gráfica siguiente:

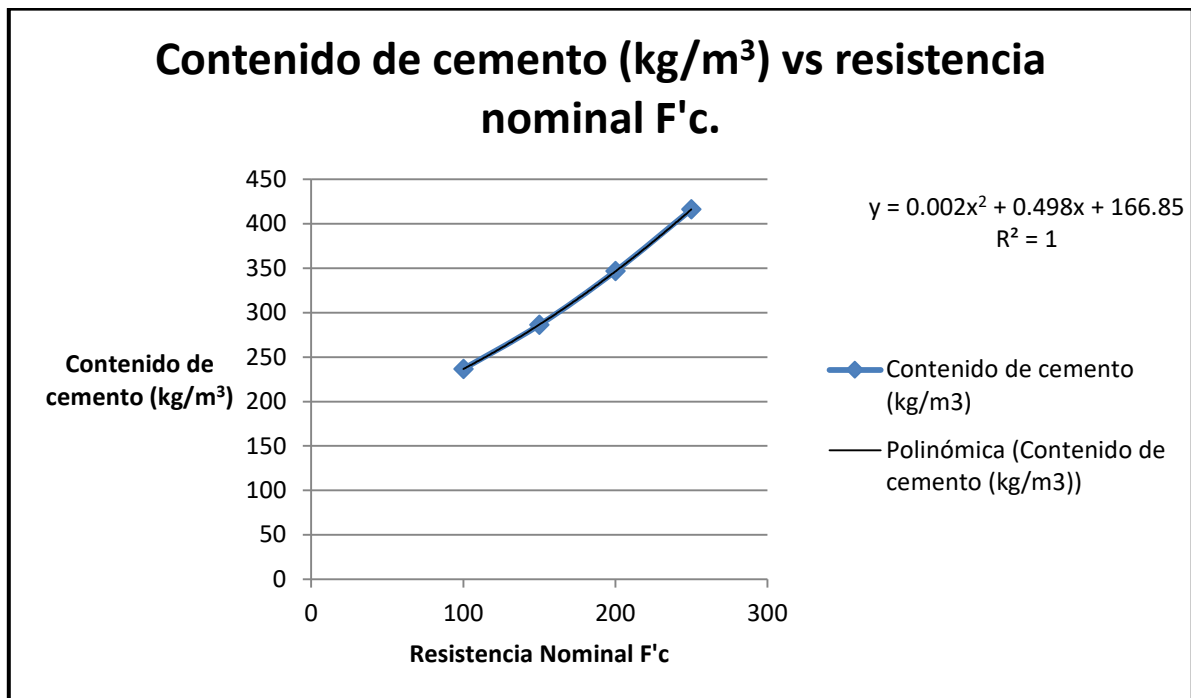


Figura No. 9: Contenido de cemento versus resistencia nominal F'c en el concreto hecho a mano. Fuente: Elaboración propia.

Las resistencias promedio necesarias de acuerdo a la fórmula antes presentada y considerando el coeficiente de variación $V = 25\%$, son calculadas y con base en ellas se determinan las resistencias nominales que tendrían con esos contenidos de cemento pero siendo fabricadas de acuerdo a los procedimientos de premezclado en planta (con $V = 8\%$) al emplear la misma fórmula, de la que se despeja $f'c$:

$$f'c = fp (1 - tV)$$

Los resultados se resumen en la tabla siguiente:

Tabla No. 20: Resistencias de concretos hechos a mano vs premezclados.

Resistencia f'c Nominal hecho en obra (kg/cm ²)	Resistencia fp promedio necesaria (kg/cm ²)	Resistencia f'c nominal en premezclado (kg/cm ²)
100	169.49	147.25
150	254.24	220.88
200	338.98	294.51
250	423.73	368.14

Como los contenidos de cemento siguen siendo los mismos aun cuando las resistencias nominales se incrementan, es posible ahora presentar la relación de resistencias versus contenidos de cemento para estos nuevos valores:

Tabla No. 21: Contenido de cemento de concretos premezclados.

Resistencia nominal f'c en premezclado (kg/cm ²)	Contenido de cemento (kg/m ³)
147.25	236.75
220.88	286.25
294.51	346.75
368.14	416.25

Graficando esta relación y determinando la ecuación de ajuste se tiene:

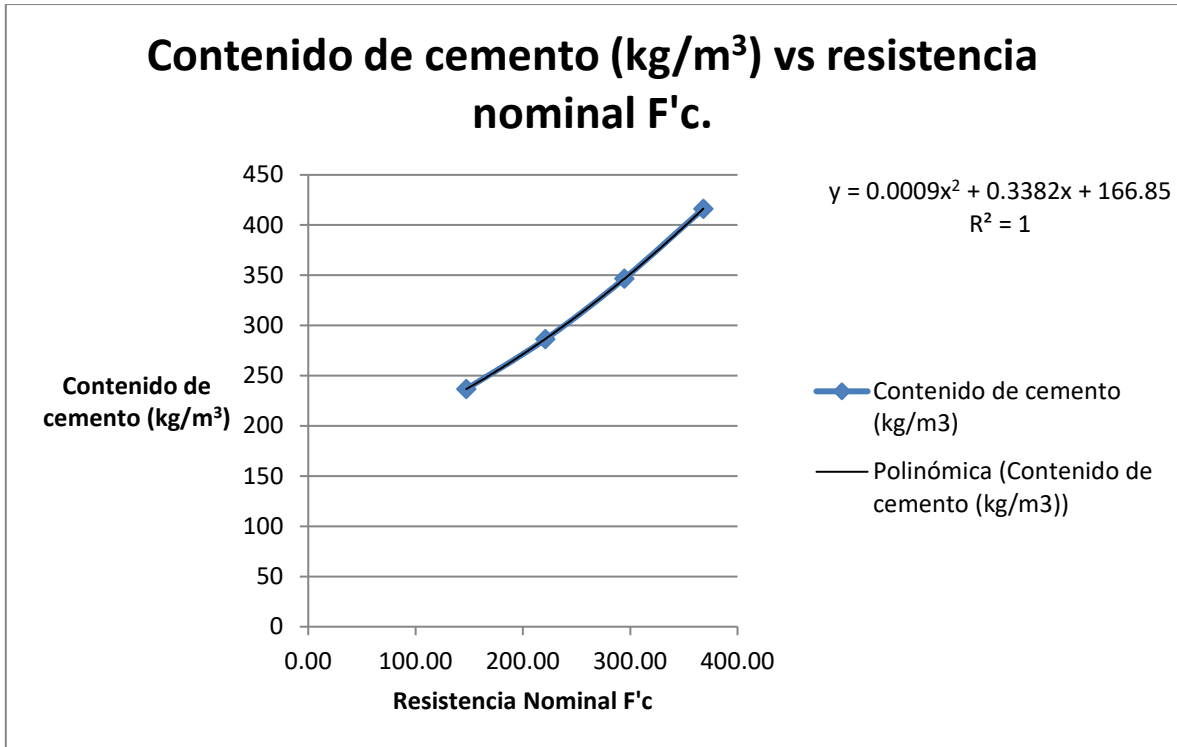


Figura No. 10: Contenido de cemento versus resistencia nominal F'c de concretos premezclados. Fuente: Elaboración propia.

Por último se calculan los contenidos de cemento correspondientes a las resistencias nominales de interés aplicando la fórmula de ajuste encontrada:

Tabla No. 22: Contenido de cemento en concretos premezclados de resistencias nominales comerciales.

Resistencia nominal en premezclado (kg/cm ²)	Contenido de cemento (kg/m ³)
100	209.67
150	237.83
200	270.49
250	307.65

Para las proporciones de los agregados y el agua se tomarán los promedios de los reportados por los fabricantes.

Tabla No. 23: Proporciones promedios de concretos.

Resistencia nominal (kg/cm ²)	Grava (m ³)	Arena (m ³)	Agua (l)
100	0.64925	0.5830	222.75
150	0.67625	0.5658	222.75
200	0.69525	0.5370	223.50
250	0.70675	0.5163	232.25

Para la fabricación del concreto existen muchos equipos con diversas capacidades de producción y diferentes consumos de energía eléctrica, siendo razonable pensar que a mayor capacidad de producción es mayor el consumo de energía eléctrica. En la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas existen varias plantas de producción de concretos premezclados, siendo las más importantes las siguientes:

- Concretos Premezclados del Sur.
- CEMEX Planta Tuxtla.
- Cruz Azul Planta Tuxtla.
- GORSA Concretos.

En general los equipos que se emplean para la fabricación del concreto premezclado son:

- Dosificadora de concreto.
- Silo de cemento.
- Tolvas de agregados.
- Transportador de banda.
- Báscula de cemento.
- Báscula de agregados.
- Dosificador de agua con bomba.

- Cargador Frontal.
- Camión revolvedora.

Además de estos equipos que participan de manera directa en el proceso de producción, se requiere de un camión de 1 t a 3 t de capacidad de carga, para el transporte de combustibles, aceites y refacciones a la planta de producción, así como un vehículo utilitario para las actividades diversas.

Debido a la dificultad para obtener datos directos para elaborar el inventario de insumos de las plantas concreteras, se tomarán valores de insumos referenciados en la literatura.

Cálculo de emisiones de GEI.

Por consumo de energía eléctrica.

Los equipos de dosificación y transportación por bandas son eléctricos y consumen 4.36 kWh/m³ (Johnson, 2006), por lo que considerando un factor de emisiones de GEI por electricidad de 0.591291 kg CO₂e/kWh, se tendrían emisiones de GEI por consumo eléctrico de 2.578 kg CO₂e/m³.

Emisiones atribuibles a los materiales de las mezclas.

De acuerdo al inventario y con base en cálculos previos de emisiones de los materiales se calculan las emisiones de GEI correspondientes a estos materiales para cada tipo de concreto:

Tabla No. 24: Emisiones de GEI por materiales para concreto $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$

Materiales	Cantidad	Factor de emisión	Emisiones
Cemento	210 kg	0.955924 kg CO ₂ e /kg	200.74
Grava triturada de ¾"	0.649 m ³	31.613540 kg CO ₂ e/m ³	20.517
Arena de río	0.683 m ³	11.808 kg CO ₂ e/m ³	8.065
Agua	223 l	0.0009184 kg CO ₂ e/l	0.205

SUMA: 229.53 kg CO₂e/m³

Tabla No. 25: Emisiones de GEI por materiales para concreto $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$

Materiales	Cantidad	Factor de emisión	Emisiones
Cemento	238 kg	0.955924 kg CO ₂ e /kg	227.51
Grava triturada de ¾"	0.676 m ³	31.613540 kg CO ₂ e/m ³	21.371
Arena de río	0.566 m ³	11.808 kg CO ₂ e/m ³	6.683
Agua	223 l	0.0009184 kg CO ₂ e/l	0.205

SUMA: 255.77 kg CO₂e/m³

Tabla No. 26: Emisiones de GEI por materiales para concreto $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$

Materiales	Cantidad	Factor de emisión	Emisiones
Cemento	270 kg	0.955924 kg CO ₂ e /kg	258.10
Grava triturada de ¾"	0.695 m ³	31.613540 kg CO ₂ e/m ³	21.971
Arena de río	0.537 m ³	11.808 kg CO ₂ e/m ³	6.341
Agua	224 l	0.0009184 kg CO ₂ e/l	0.206

TOTAL: 286.62 kg CO₂e/m³

Tabla No. 27: Emisiones de GEI por materiales para concreto $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$

Materiales	Cantidad	Factor de emisión	Emisiones
Cemento	308 kg	0.955924 kg CO ₂ e /kg	294.425
Grava triturada de ¾"	0.707 m ³	31.613540 kg CO ₂ e/m ³	22.351
Arena de río	0.516 m ³	11.808 kg CO ₂ e/m ³	6.093
Agua	232 l	0.0009184 kg CO ₂ e/l	0.213

TOTAL: 323.08 kg CO₂e/m³

Por alimentación de las tolvas de agregados. Se considera que la alimentación de las tolvas de agregados se efectúa por medio de un cargador frontal John Deere 555G, este cargador tiene un cucharón de carga de 1.15 m³ de capacidad, por lo que para alimentar de los agregados necesarios a la tolva requiere de un promedio de agregados en volumen por m³ de concreto = 1.19875 m³.

Suponiendo que la carga no siempre alcanza el máximo de la capacidad del cucharón, se supondrá una eficiencia del 80%, por lo que tendremos:

$$\text{Movimientos de carga} = 1.19875 / (0.8 * 1.15) = 1.303$$

El tiempo del ciclo de carga dependerá de la distancia a la que se ubiquen los agregados, que se supondrá de 20 m. Con base en estas consideraciones se estima una duración del ciclo de carga de 0.025 h/carga. El tiempo efectivo de operación del cargador por cada m³ de concreto será:

$$0.025 \text{ h/carga} * 1.303 \text{ carga/m}^3 = 0.032575 \text{ h/m}^3.$$

Por otra parte el factor horario de emisiones de GEI de este equipo es de:

25.42 kg CO₂e/h, por lo que las emisiones estimadas por la carga de los agregados a las tolvas sería:

Emisiones por carga = $0.032575 \text{ h/m}^3 * 25.42 \text{ kg CO}_2\text{e/h} = 0.8280565 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$.

Emisiones por traslado y mezcla del concreto. Se considera que se emplea un camión revolvedora de 7 m^3 de capacidad, las distancias de las plantas de premezclados de concreto a las obras es variable. Los nuevos desarrollos habitacionales se ubican usualmente en las afueras de la ciudad. Las distancias de las plantas de concretos premezclados a los tres desarrollos habitacionales que se analizan en este documento son:

Tabla No. 28: Distancia en km de las plantas de concretos premezclados a las obras en análisis.

Desarrollo habitacional	CEMEX Planta Tuxtla	CRUZ AZUL Planta Tuxtla	GORSA Concretos	Concretos Modernos del Sur
San Juan	7	19	3	10
Los Poetas	5	18	3	9
Real del Bosque	17	9	15	12

La distancia promedio de las plantas de premezclados a los fraccionamientos analizados es de 10.6 km. La velocidad promedio dependerá de las condiciones de tráfico, por lo que se supondrá de 30 km/h.

El factor horario de emisiones de GEI de un camión revolvedora de 7 m^3 de capacidad es de $104.4115 \text{ kg CO}_2\text{e/h}$, por lo que las emisiones por m^3 serán:

Emisiones por transporte = $104.4115 \text{ kg CO}_2\text{e/h} * (10.6 \text{ km} * 2) / 30 \text{ km/h}$.

Emisiones por transporte = $10.541 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$.

Emisiones por bombeo del concreto. Para colocar el concreto en las obras de edificación es muy común el empleo de bombas de concreto que permiten tanto elevar el concreto para el colado de elementos elevados, como alcanzar distancias

alejadas del camión facilitando y abaratando el proceso. Estas bombas operan consumiendo diesel.

Para efectos de los cálculos se empleará el factor horario de emisiones de una bomba de concreto Reinert P-6 de 69 a 76 m³/h, con motor Caterpillar 3208 de 200 hp. El factor horario de emisiones de este equipo es de 71.3217 kg CO₂e/h, por lo que suponiendo que la velocidad de descarga sea del 50% de la velocidad nominal se tendría:

Emisiones de GEI por bombeo del concreto = 71.3217 kg CO₂e/h * 1/(70 * 0.5)

Emisiones de GEI por bombeo del concreto = 2.03776 kg CO₂e/m³.

Emisiones totales. En resumen las emisiones de GEI por la fabricación y transporte del concreto premezclado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, en kg CO₂e/m³ son las siguientes:

Tabla No. 29: Emisiones de GEI por fabricación de concretos premezclados.

Tipo de concreto	F'c=100 kg/cm ²	F'c=150 kg/cm ²	F'c=200 kg/cm ²	F'c=250 kg/cm ²
Energía eléctrica	2.578	2.578	2.578	2.578
Materiales	229.53	255.77	286.62	323.08
Alimentación de tolvas	0.828	0.828	0.828	0.828
Traslado	10.541	10.541	10.541	10.541
Bombeo	2.038	2.038	2.038	2.038
Sumas	245.515	271.755	302.605	339.065

Conclusiones. Las emisiones de GEI por metro cúbico de concreto premezclado fabricado y empleado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, colocado en obra con bomba son:

Tabla No. 30: Factores de emisiones de GEI por fabricación de concretos premezclados.

Tipo de Concreto	Emisiones de GEI (kg CO ₂ /m ³)
f'c = 100 kg/cm ²	245.51
f'c = 150 kg/cm ²	271.55
f'c = 200 kg/cm ²	302.60
f'c = 250 kg/cm ²	339.06

6.4.8 Bloques de concreto.

Unidad Funcional: Un bloque de concreto hueco de 12x20x40, 15x20x40 y 20x20x40.

Alcances: Se consideran los Alcances 1, 2 y 3.

Para realizar el inventario de materiales y equipo empleados en la fabricación de los bloques de mortero, se analizó la producción de una empresa bloquera semi-industrializada ubicada en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. El proceso de fabricación consiste en:

- a) Extracción, carga y acarreo de arena del río Santo Domingo a la fábrica.
- b) Extracción, trituración, cribado, carga y acarreo del polvo de roca desde el banco de Tritux.
- c) Movimiento de los agregados a la mezcladora eléctrica por medio de una retroexcavadora 580K.
- d) Carga a mano y mezcla de los materiales en la mezcladora eléctrica tipo turbina con dosificador automático de agua marca ITAL-MEXICANA modelo TR-60 con 3 hp de potencia y producción máxima de 60 l/min (3 m³/h).
- e) Transporte a la tolva de alimentación de la mesa vibratoria por medio de una banda transportadora eléctrica propulsada por un motor de 1 hp

- f) Llenado de moldes, vibrado, prensado y desmoldado de los bloques en la bloquera marca ITAL-MEXICANA modelo V-63-R, con motor eléctrico de 3 hp
- g) Carga a mano y acarreo con carretón al patio de secado.
- h) Carga a mano al camión repartidor, acarreo al sitio de la obra y descarga a mano en el mismo.

Los equipos empleados en la producción y sus rendimientos son los siguientes:

Tabla No. 31: Equipos empleados en la producción de bloques de concreto.

Equipo	Horas/jornada
Retroexcavadora 580 K	1
Mezcladora eléctrica marca Ital-Mexicana, modelo TR-60.	6
Banda transportadora eléctrica.	6
Bloquera eléctrica marca Ital-Mexicana, modelo V-63-R	6

El equipo tiene como meta de producción diaria, de acuerdo a los datos proporcionados por la empresa, los siguientes productos:

Tabla No. 32: Metas diarias de producción de bloques de concreto.

Producto	Número de piezas de jornada	Peso por pieza ⁽¹⁾ (kg/pza)	Peso (kg)
Bloque hueco de 12 x 20 x 40	330	12.0	3,960
Bloque hueco de 15 x 20 x 40	350	14.1	4,935
Bloque hueco de 19 x 19 x 40 (paredes delgadas)	370	13.6	5,032
Bloque macizo de 12 x 20 x 40	310	17.2	5,332
Bloque macizo de 15 x 20 x 40	310	24.4	7,564
Adopasto	430	15.8	6,794
Adoquín rojo de 25 x 22 x 8	430	8.0	3,440
Adoquín de 40 x 40 x 8	-	21.8	0
Tabicón de 28 x 10 x 13	320	6.8	2,176
SUMA:			39,233 kg

(1) Cada producto fue pesado en campo.

Por otra parte reportan un consumo diario de 25 bultos de 50 kg de cemento Portland, 3 m³ de arena de río y 4 m³ de polvo de roca. Los pesos volumétricos de los agregados se estiman en 1,500 kg/m³ para la arena seca de río y de 1350 kg/m³ para el polvo de roca, por lo que el peso de la mezcla resultante sería:

Peso del cemento:	1,250 kg
Peso del agua:	1,250 kg
Peso de la arena:	4,500 kg
Peso del polvo de roca:	5,400 kg
Peso total:	12,400 kg

Al contrastar el peso de los insumos contra el peso de la producción diaria esperada, es evidente que ese nivel de producción no se alcanza con los insumos reportados por lo que se emplearán datos de rendimiento del equipo y proporciones basados en el reporte del operador de la bloquera. Estos valores contrastan fuertemente con los valores de producción que se fijaron como meta diaria por parte de la administración, así como los rendimientos esperados por el fabricante de la bloquera, ya que de acuerdo a éste último (Ital-Mexicana), ésta tiene los siguientes rendimientos:

Bloques huecos de 12 x 20 x 40	3,200 pzas/jor
Bloques huecos de 15 x 20 x 40	2,400 pzas/jor
Bloques huecos de 20 x 20 x 40	1,600 pzas/jor

Considerando jornadas de 8 horas efectivas de trabajo, sin embargo de acuerdo a lo observado en la planta de producción solamente se trabajan 6 horas efectivas y debido a los ritmos de carga y descarga de las tarimas, el proceso se vuelve aun

más lento ya que el operador de la bloquera debe esperar a que regresen los cargadores para poder descargar la bloquera e iniciar un nuevo ciclo. Considerando estos factores y de acuerdo con las estimaciones del operador de la bloquera, la producción diaria cuando se abocan a producir únicamente bloques es de alrededor de 1,000 bloques/jor, cantidad que coincide razonablemente con los pesos de los insumos reportados. En conclusión, la producción estableció metas diarias que no se alcanzan en las jornadas ordinarias de trabajo, debido a deficiencias en el proceso de producción.

Respecto a los proporcionamientos, de acuerdo a los insumos reportados, se tendrían las siguientes proporciones:

Cemento: 50 kg

Arena: 0.12 m³

Polvo de roca: 0.16 m³

Proporción del cemento al total de agregados: 1:8.4

Esta proporción es similar al promedio de los reportados por los diversos estudios previos:

Tabla No. 33: Proporción cemento:agregados en la producción de bloques de concreto.

Fuente	Proporciones cemento: agregados
Hernández y Maza, 2011	1:12
Arrieta-Freyre, Javier y Peñaherrera-Deza, 2001	1:7
Barcala et al	1:9.12
Moreno-Martinez, 2008	1:10.26
Valdés y Rapimán, 2007	1:8.46

Promedio de proporciones: 1:9.368

Para el cálculo de las emisiones por materiales se tomará la proporción 1:8.4 deducido de los insumos y producción reportados en la planta de producción de bloques estudiada. La proporción en volumen considerando las partes de cemento-polvo de roca-arena sería el siguiente: 1:4.8:3.6. Esta misma proporción dada en peso sería 1: 4.32: 3.60.

Cálculo de emisiones.

a. Emisiones de GEI por consumo eléctrico:

Las emisiones por consumo eléctrico se calculan considerando el factor de emisiones de GEI calculado para los fines de esta investigación. Este factor es el siguiente:

Factor de emisiones de GEI eléctrico = 0.591291 kg CO₂e/kWh

Potencia total de los equipos eléctricos que operan en la planta:

Mezcladora: 3 hp

Banda transportadora: 1 hp

Bloquera: 3 hp

Total de potencia instalada: 7 hp = 0.7457 kW/hp * 7 hp = 5.2199 kW

Consumo en la jornada efectiva de 6 horas: 5.2199 kW * 6 h = 31.3194 kWh

Emisiones por consumo eléctrico: 18.52 kg CO₂e/jor

Emisiones por consumo eléctrico por bloque: 0.01852 kg CO₂e/bloque.

b. Emisiones por materiales:

Se estiman las cantidades de materiales en función de los pesos medidos en cada tipo de bloque por lo que por cada bloque fabricado se requieren las siguientes cantidades de materiales en peso:

Tabla No. 34: Cantidades de materiales requeridas por bloque de concreto fabricado.

Bloque hueco	Cemento (kg)	Agua (kg)	Polvo de roca (kg)	Arena (kg)
12 x 20 x 40 (12.0)	1.21	1.21	5.23	4.35
15 x 20 x 40 (14.1)	1.42	1.42	6.14	5.12
20 x 20 x 40 (13.6)	1.37	1.37	5.92	4.94

Estas proporciones en unidades compatibles con los factores de emisiones de GEI correspondientes serían, de acuerdo a los pesos volumétricos supuestos:

Tabla No. 35: Cantidades de materiales requeridas por bloque de concreto fabricado, en unidades compatibles.

Bloque hueco	Cemento (kg)	Agua (l)	Polvo de roca (m ³)	Arena (m ³)
12 x 20 x 40 (12.0)	1.21	1.21	0.003874	0.002900
15 x 20 x 40 (14.1)	1.42	1.42	0.004581	0.003413
20 x 20 x 40 (13.6)	1.37	1.37	0.004385	0.003293

Una estimación rápida de las emisiones de GEI por el suministro de agua entubada proveniente del río Grijalva, se hará considerando el desnivel entre el tanque de distribución más cercano a la fábrica y la zona de captación en el río Grijalva.

El tanque se estima que se encuentra en la cota 680 msnm, mientras que la obra de captación se ubica en la cota 395 msnm, por lo que el desnivel que salva es de 285 m, si consideramos que el total de las pérdidas a lo largo de la conducción son del 50% de la carga por diferencia de altura (debido a lo lejano de la captación) entonces tendremos una carga total de 427.5 m, por lo que la potencia necesaria para generar un flujo unitario (l/s) con ese desnivel sería:

$$P = \gamma Q \Delta H / \xi = 1000 \text{ kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 * 0.001 \text{ m}^3/\text{s} * 427.5 \text{ m} / 0.75 = 5,592 \text{ kg} * \text{m/s}^3 = 5.59 \text{ kW}.$$

La energía eléctrica necesaria para llevar un litro de agua a la planta de producción de bloques de concreto sería:

$$E = P \cdot t = 5.59 \text{ kW} \cdot (1 \text{ s}) = 5.59 \text{ kW} (1/3600 \text{ h}) = 0.00155325 \text{ kWh/l}$$

Las emisiones correspondientes serían:

Emisiones de GEI por transporte del agua del río a la bloquera =

$$= 0.00155325 \text{ kWh/l} \cdot 0.591291 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} = 0.0009184 \text{ kg CO}_2\text{e/l}$$

Por lo que los factores de emisiones de GEI para los materiales empleados serán los siguientes:

Tabla No. 36: Factores de emisiones de GEI de materiales que se emplean en la fabricación de bloques de concreto.

Material	Factor de emisiones de GEI
Cemento portland ordinario	0.955924 kg CO ₂ e /kg cemento
Arena de río	11.808 kg CO ₂ e/m ³
Polvo de roca	13.7450 kg CO ₂ e/m ³ polvo de roca
Agua	0.0009184 kg CO ₂ e/l

Las emisiones por los materiales empleados por cada bloque fabricado serán:

Tabla No. 37: Emisiones de GEI por materiales para la fabricación de un bloque hueco de 12 x 20 x 40.

Material	Cantidad	Factor de emisión	Emisiones Kg CO ₂ e
Cemento portland ordinario	1.21 kg	0.955924 kg CO ₂ e /kg cemento	1.156668
Arena de río	0.002900 m ³	11.808 kg CO ₂ e/m ³	0.03424
Polvo de roca	0.003874 m ³	13.7450 kg CO ₂ e/m ³ polvo	0.053248
Agua	1.21 l	0.0009184 kg CO ₂ e/l	0.001111

$$\text{SUMA} = 1.245267 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Tabla No. 38: Emisiones de GEI por materiales para la fabricación de un bloque hueco de 15 x 20 x 40

Material	Cantidad	Factor de emisión	Emisiones Kg CO ₂ e
Cemento portland ordinario	1.42 kg	0.955924 kg CO ₂ e /kg cemento	1.357412
Arena de río	0.003413 m ³	11.808 kg CO ₂ e/m ³	0.040301
Polvo de roca	0.004581 m ³	13.7450 kg CO ₂ e/m ³ polvo	0.062966
Agua	1.42 l	0.0009184 kg CO ₂ e/l	0.001304

SUMA =1.461983 kg CO₂e

Tabla No. 39: Emisiones de GEI por materiales para la fabricación de un bloque hueco de 20 x 20 x 40

Material	Cantidad	Factor de emisión	Emisiones Kg CO ₂ e
Cemento portland ordinario	1.37 kg	0.955924 kg CO ₂ e /kg cemento	1.309616
Arena de río	0.003293 m ³	11.808 kg CO ₂ e/m ³	0.038883
Polvo de roca	0.004385 m ³	13.7450 kg CO ₂ e/m ³ polvo	0.060272
Agua	1.37 l	0.0009184 kg CO ₂ e/l	0.001258

SUMA =1.410029 kg CO₂e

c. Emisiones por consumo de diesel en la planta de fabricación.

El único equipo que emplea diesel en el proceso productivo es una retroexcavadora que sirve para mover los agregados. De acuerdo al reporte del operador de la retroexcavadora el consumo de diesel es de 40 l/semana lo que equivale a 6.67 l/jor. El consumo de combustible de este equipo es de 8.35 l/h, por lo que las horas diarias trabajadas se estiman en 6.67/8.35 que es igual a 0.8 h/jor.

El factor de emisiones horarias de GEI de la retroexcavadora es de 29.0979 kg CO₂e/h, por lo que las emisiones diarias serían:

$$0.8 \text{ h/jor} * 29.0979 \text{ kg CO}_2\text{e/h} = 23.2783 \text{ kg CO}_2\text{e/jor}$$

Considerando la producción diaria de 1000 bloques, tendríamos que las emisiones por bloque debido a este concepto serán:

$$(23.2783 \text{ kg CO}_2\text{e/jor})/(1000 \text{ bloques/jor}) = 0.0232783 \text{ kg CO}_2\text{e/bloque.}$$

d. Emisiones por depreciación.

El costo de la bloquera nueva analizada incluyendo la banda transportadora y la mezcladora se estima en \$375,000.00, por lo que el costo a precios del 2003 sería igual al costo actual entre la relación de índices de costos enero 2012/promedio 2003:

$$\text{INPC enero 2012} = 104.284 \text{ (base 2}^{\text{a}} \text{ quincena de diciembre de 2010)}$$

$$\text{INPC diciembre de 2010} = 144.639 \text{ (base 2}^{\text{a}} \text{ quincena de junio de 2002)} = 100$$

$$\text{INPC enero 2012} = 104.284 * 144.639/100 = 150.835 \text{ (base 2}^{\text{a}} \text{ quincena de junio de 2002)}$$

$$\text{INPC promedio 2003} = 104.7815 \text{ (base 2}^{\text{a}} \text{ quincena de junio de 2002)}$$

$$\text{Factor inflacionario 2003-enero de 2012} = 150.835 / 104.7815 = 1.4395$$

$$\text{Costo estimado del equipo a precios del 2003} = \$375,000.00/1.4395 = 260,507.12$$

El factor de emisiones por maquinaria y equipo obtenido de la Matriz de Insumo-Producto de la economía mexicana de 2003, procesada para obtener la Matriz Inversa de Leontief es:

$$\text{Factor de emisión por depreciación de maquinaria} = 0.0643964 \text{ kg CO}_2\text{e/peso 2003}$$

$$\text{Emisiones por depreciación} = 0.0643964 \text{ kg CO}_2\text{e/peso 2003} * 260,507.12$$

$$\text{Emisiones por depreciación} = 16,775.72 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

$$\text{Horas trabajadas} = 6 \text{ h/jor} * 6 \text{ jor/sem} * 52 \text{ sem/año} * 10 \text{ años} = 18,720 \text{ h}$$

$$\text{Producción horaria} = (1000 \text{ bloques /jor})/(6\text{h/jor}) = 166.67 \text{ bloques /h}$$

$$\text{Producción total a lo largo de su vida útil} = 166.67 \text{ h} * 18720 \text{ h} = 3'120,000 \text{ bloques}$$

Emisiones de GEI por depreciación por bloque = 0.005377 kg CO₂e/bloque.

e. Emisiones por transporte.

Las distancias de las bloqueras a las distintas obras es muy variable, sin embargo, considerando que prácticamente todas las bloqueras se encuentran en las afueras por la factibilidad del acarreo de los agregados, tendríamos que para la bloquera más alejada de una obra ubicada en la propia ciudad la distancia es de aproximadamente 16 km, por lo que una distancia media debe ser de aproximadamente 8 km.

De acuerdo al análisis de emisiones de GEI horarias de un camión de tres toneladas de capacidad de carga, el factor de emisiones es de 27.1605 kg CO₂e/h. Por otra parte por ser un recorrido suburbano, la velocidad promedio de un camión se estima en 30 km/h, por lo que el tiempo total de recorrido en un ciclo sería:

Tiempo de recorrido = 16 km / 30 km/h = 0.5333 h

Siendo las emisiones correspondientes las siguientes:

Emisiones por transporte de tres toneladas de carga = 0.5333 h * 27.1605 kg CO₂e/h
= 14.4847 kg CO₂e/carga.

Ahora bien, la cantidad de bloques que el camión puede cargar depende del tipo de bloque:

Bloques huecos de 12 x 20 x 40 (12 kg/pza)	250
Bloques huecos de 15 x 20 x 40 (14.1 kg/pza)	213
Bloques huecos de 20 x 20 x 40 de paredes delgadas (13.6 kg/pza)	221

Las emisiones por bloque serán entonces:

Bloques huecos de 12 x 20 x 40 (12 kg/pza)	0.057939 kg CO ₂ e/pza
Bloques huecos de 15 x 20 x 40 (14.1 kg/pza)	0.068003 kg CO ₂ e/pza
Bloques huecos de 20 x 20 x 40 (13.6 kg/pza)	0.065541 kg CO ₂ e/pza

Las emisiones totales por la fabricación y transporte de los bloques (kg CO₂e/bloque) se estiman en:

Tabla No. 40: Resumen de emisiones de GEI por la fabricación de bloques de concreto.

Bloque	Consumo eléctrico	Materiales	Diesel en fabricación	Transporte	Depreciación	Total
12 x 20 x 40	0.01852	1.245267	0.0232783	0.057939	0.005377	1.3503813
15 x 20 x 40	0.01852	1.461983	0.0232783	0.068003	0.005377	1.5670973
20 x 20 x 40	0.01852	1.410029	0.0232783	0.065541	0.005377	1.5151433

Se aprecia claramente que el factor que más impacta en las emisiones de GEI es la fabricación de los materiales que se emplean, en particular el cemento, que por si solo representa entre el 86% (aproximadamente) de las emisiones de GEI atribuibles a la fabricación y transporte de los bloques.

Las emisiones por cada tipo de bloque analizado en función de su peso serían:

Tabla No. 41: Emisiones de GEI por la fabricación de bloques de concreto en función de su peso.

Tipo de bloque	Peso por pieza (kg)	Emisiones (kg CO ₂ e/kg de bloque)
12 x 20 x 40	12.0	0.112532
15 x 20 x 40	14.1	0.111142
20 x 20 x 40	13.6	0.111408

Promedio de emisiones: 0.111694 kg CO₂e/kg de bloque

6.4.9 Madera de pino de 3ª en secciones de escuadría.

Objetivos: Estimar las emisiones de GEI, atribuibles al uso de la madera aserrada como cimbra en la construcción urbana en el Estado de Chiapas, siguiendo la metodología del análisis de ciclo de vida.

Unidad funcional: Un metro cuadrado de cimbra para losa de concreto armado de 10 cm de espesor considerando una altura libre de piso a techo de 3.00 m.

Parámetro ambiental: Emisiones de gases de efecto invernadero en términos de CO₂ equivalente (CO₂e), de acuerdo a su potencial de calentamiento global (GWP₁₀₀) en 100 años.

Consideraciones:

- Se considerará al cambio en el uso del suelo, como una de las fuentes de emisiones de CO₂e.
- Se tomarán los contenidos de carbono por hectárea calculados por De Jong (2001).
- Se empleará la matriz de cambios en el uso del suelo 1975-2000 para el Estado de Chiapas desarrollada por Vázquez-Sánchez et al (2005).
- El inventario de materiales y energía empleados en el proceso se determinan con base en investigación de campo en un aserradero.

El proceso de cálculo es el siguiente:

- ❖ Estimación de las emisiones de GEI por deforestación:
 - Se recopila información de los contenidos de carbono por hectárea (tC/ha) para cada tipo de cubierta vegetal.

- Con base en la matriz de cambios de uso de suelo 1975-2000 se calcula la pérdida de carbono por cambios en el uso de suelo considerando el cambio de una hectárea de bosque de coníferas a otros tipos de usos de suelo.
- Se calcula la cantidad de CO₂e que se emite a la atmósfera por metro cúbico de madera de escuadría obtenida.
- ❖ Estimación de emisiones de GEI por consumo de combustibles fósiles durante la extracción, procesamiento y transporte de la madera.
 - Se elabora un diagrama del proceso y con base en datos recabados en campo mediante entrevista al gerente de un aserradero, se elabora un inventario de equipos y materiales que se emplean en el proceso.
 - Con base en el inventario recabado se calculan las emisiones de GEI correspondientes.
- ❖ Estimación de emisiones por fabricación de la cimbra de losa.
 - Análisis del inventario de materiales empleado por metro cuadrado.
 - Cálculo de las emisiones correspondientes al inventario.

Estimación de emisiones de GEI por cambio en el uso de suelo.

El área de los bosques de coníferas en el Estado de Chiapas ha variado de 833,697 ha en 1975 a 652,382 ha en el año 2000, ocasionando una disminución neta de 181,315 ha en ese periodo (Vázquez-Sánchez et al, 2005).

De la matriz de cambios en el uso de suelo de Chiapas entre los años 1975 y 2000, se puede observar que esta disminución en el área de los bosques de coníferas se debe a su transformación en otros usos del suelo:

Vegetación secundaria:	200,087 ha.
Agricultura de temporal:	75,033 ha.

Pastizales: 58,359 ha.

Bosques mesófilos: 8,337 ha.

Selvas húmedas: 8,837 ha.

Área total transformada de los bosques de coníferas: 350,153 ha.

Por otra parte 169,385 ha de áreas con usos de suelo diferentes a los bosques de coníferas se transformaron a bosques de coníferas en el período analizado.

Con base en los datos de cambios en el uso del suelo en Chiapas, la pérdida de carbono por el cambio en el uso de suelos de bosques de coníferas a otros usos entre los años 1975 y 2000 se estima con las fórmulas siguientes:

$$C_{1975} = A_{BC} * C_{BC} \quad \text{Fórmula No. 1}$$

$$C_{2000} = \sum A_i * C_i \quad \text{Fórmula No. 2}$$

$$\Delta C_{1975-2000} = C_{2000} - C_{1975} \quad \text{Fórmula No. 3}$$

$$\Delta C_{\text{unitario}} = \Delta C_{1975-2000} / A_{\text{CORTADA}} \quad \text{Fórmula No. 4}$$

$$FR = A_{\text{RECUPERADA}} / A_{\text{CORTADA}} \quad \text{Fórmula No. 5}$$

$$\Delta C_{\text{unitario neto}} = (1 - FR) * C_{\text{unitario}} \quad \text{Fórmula No. 6}$$

Siendo:

C_{1975} el contenido de carbono, en 1975, en las zonas ocupadas por bosques de coníferas.

C_{2000} el contenido de carbono, en el año 2000, en las zonas que en 1975 eran bosques de coníferas.

A_i el área, en hectáreas, correspondiente al uso de suelo i .

C_i el contenido de carbono por hectárea (De Jong, 2001).

$\Delta C_{1975-2000}$ es la variación, al año 2000, del contenido de carbono en las áreas ocupadas por bosques de coníferas en el año 1975.

$\Delta C_{\text{unitario}}$ es la variación del contenido de carbono por cada hectárea de bosques de coníferas que hubiese sido cortado en el período 1975-2000.

FR es un factor de recuperación, que nos indica que fracción de los bosques cortados se recuperan.

$A_{\text{RECUPERADA}}$ es el área que se transformó en bosques de coníferas en el período 1975-2000.

A_{CORTADA} es el área de bosques de coníferas que fue cortada en el período 1975-2000.

$\Delta C_{\text{unitario neto}}$ es la variación neta del contenido de carbono por hectárea cortada.

$$C_{1975} = 350,153 \text{ ha} * 318.3 \text{ tC/ha} = 111'453,699.9 \text{ tC}$$

Tabla No. 42: Cantidad de carbono (C_{2000}) en las áreas de bosques de coníferas deforestados

Uso del suelo	Ai	Ci	Ai*Ci
Vegetación secundaria	200,087	222.2	44'459,331
Agricultura de temporal	75,033	159.9	11'997,777
Pastizales	58,359	146.7	8'561,265
Bosques mesófilos	8,337	324.6	2'706,190
Selvas húmedas	8,837	242.4	2'141,868
Sumas	350,653		69'866,431

$$\Delta C_{1975-2000} = 111'453,699.9 \text{ tC} - 69'866,431 \text{ tC} = 41'587,268 \text{ tC}$$

$$\Delta C_{\text{unitario}} = 41'587,268 \text{ tC} / 350,153 \text{ ha} = 118.77 \text{ tC/ha}$$

$$FR = 169,385 / 350,153 = 0.4837$$

$$\Delta C_{\text{unitario neto}} = (1 - 0.4837) * 118.77 \text{ tC/ha} = 61.31 \text{ tC/ha}$$

Emisiones de CO₂ por hectárea de bosque cortada = $44/12 * 61.31 = 224.82$ tCO₂e/ha.

Producción de madera de coníferas por hectárea.

La producción de madera depende de la especie de conífera, de su tamaño y de la densidad del bosque en México se han realizado diversas estimaciones (Granados-Sánchez et al, 2007; Pimienta et al, 2007; Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, 2011), para los cálculos subsecuentes se toma como rendimiento del bosque 75 m³/ha, correspondientes a un bosque de pino sin degradar.

La madera en rollo es aserrada para obtener la madera de escuadría. Un promedio de 57.5% de la madera en rollo se aprovecha como madera de escuadría (Nájera et al, 2006), por lo que las emisiones de GEI por m³ de madera de escuadría se estiman de acuerdo a los cálculos siguientes:

Rendimiento en la producción de madera en rollo por hectárea = 75 m³ mad en rollo/ha.

Emisiones de CO₂e/ha por cambio de uso del suelo = 224.82 tCO₂e/ha.

Fracción de madera de escuadría por m³ de madera en rollo = 0.575

Emisiones de GEI por cambio de uso de suelo por m³ de madera en secciones de escuadría = $224.82/(75*0.575) = 5.213$ tCO₂e/m³ mad de escuadría.

Emisiones de GEI durante el proceso de producción de la madera de escuadría.

Los combustibles fósiles emiten GEI durante su combustión (emisiones directas), pero también durante el proceso de su producción (emisiones indirectas). Los factores de emisión totales (FET) de GEI de la gasolina y el diesel son, de acuerdo con los cálculos efectuados para este documento las siguientes:

FET gasolina = 2.863 kgCO₂e/lt

FET diesel = 3.185 kg CO₂e/lit

El factor de emisiones del aceite se obtiene aplicando el método Input-Output con base en datos de la economía mexicana del año 2003:

FETaceite = 0.541 kg CO₂e/kg aceite no-quemado.

Durante el proceso de producción de la madera de escuadría se tienen los siguientes consumos semanales:

Tabla No. 43 Consumo semanal por extracción de la madera.

Proceso	Equipo	Gasolina (l)	Diesel (l)	Aceite (l)
Extracción de la madera del bosque (200 m ³ de mad en rollo por semana)	Motosierra	20	-	1
	Tractor	-	200	2
	Grúa	200	-	2
	Camioneta	100	-	0.5
	Sumas por semana	320	200	5.5
	Consumo por m ³ de madera en rollo	1.6	1	0.0275
Transporte de la madera en rollo al aserradero (10 m ³ mad en rollo/viaje)	Camión de 12 toneladas	0	110	0.11
	Sumas por viaje	0	110	0
	Consumo por m ³ de madera en rollo	0	11	0.011
Corte de la madera en secciones de escuadría (producción de 55 m ³ de madera en rollo/día)	Generador de energía eléctrica de 145 HP para proveer energía a los equipos de corte.	-	118	0.2000
	Consumo por m ³ de madera en rollo	-	2.15 1	0.00364
	SUMA TOTAL:	1.6	14.1 51	0.04214

Emisiones de GEI por el proceso desde la extracción hasta el corte en secciones de escuadría:

$= 1.6 \text{ l gasolina} * 2.863 \text{ kgCO}_2\text{e/l gasolina} + 14.151 \text{ l diesel} * 3.185 \text{ kg CO}_2\text{e/l diesel} + 0.04214 \text{ l aceite} * 0.541 \text{ kg CO}_2\text{e/l aceite} = 49.675 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3 \text{ madera en rollo} = 86.391 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3 \text{ madera de escuadría.}$

Acarreo de la madera a la maderería. Se considera una distancia de acarreo desde el aserradero hasta la ciudad de Tuxtla Gutiérrez de 37 km. El consumo de diesel por viaje de 12 toneladas se estima en 37 litros, por lo que las emisiones por el transporte de 1 m³ de madera de escuadría serán:

$\text{Emisiones de GEI} = 1.54 \text{ lts diesel/m}^3 \text{ de madera aserrada} * 3.185 \text{ kg CO}_2\text{e/l} = 4.90 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3 \text{ de madera aserrada.}$

Por cada metro cúbico de madera en rollo procesada se obtienen 0.575 m³ de madera de escuadría y 0.425 m³ de otros subproductos y desperdicios. Por otra parte el precio de la madera de escuadría de tercera clase en el aserradero es de \$ 3,392.00/m³. El monto por m³ de madera en rollo procesada es de 0.575 m³ madera esc/mad * \$ 3,392.00/m³ madera esc = \$1,950.40.

El precio de los subproductos obtenidos de 1 m³ de madera en rollo es de \$200.00, por lo que se calculan factores de asignación con base en el valor económico de los productos:

$\text{Factor de asignación de GEI para la madera de escuadría} = 1950.40/2150.40 = \text{FA} = 0.907.$

$\text{Factor de asignación de GEI para los subproductos} = 200/2150.40 = 0.093.$

$\text{Emisiones por consumo de combustibles fósiles totales} = 0.907 * 86.391 + 4.90 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3 \text{ de mad de escuadría.}$

Emisiones por consumo de combustibles fósiles totales = 83.26 kg CO₂e/m³ de mad de escuadría.

Las emisiones totales de GEI son:

Cambio en el uso de suelo: 5,213 kg CO₂e/m³ mad escuadría.

Extracción y procesamiento: 83 kg CO₂e/m³ de mad de escuadría.

Suma: 5,299 kg CO₂e/m³ mad escuadría.

Factor de emisiones totales (FET) = 12.50 kg CO₂e/PT de madera de pino en secciones de escuadría.

6.4.10 Cimbraplay.

Unidad Funcional: Un metro cuadrado de cimbraplay de pino de 5/8" de espesor.

Para estimar las emisiones de GEI por la fabricación de este material se considera lo siguiente:

- Una gran cantidad del triplay que se emplea en México (66.21% en el año 2000) proviene de importaciones (Pérez, 2006) principalmente de los EUA.
- Las emisiones de GEI por metro cúbico de triplay en los EUA se estima en 456 kg CO₂e/m³ triplay (Wilson y Sakimoto, 2005), por lo que un metro cuadrado de cimbraplay de 5/8" fabricado en los EUA tendrá un factor de emisiones de 7.3 kg CO₂e/m².
- Las emisiones de GEI de la madera producida en México son debidas casi en su totalidad al cambio en el uso del suelo, por lo que el factor de emisiones por la fabricación del cimbraplay de 5/8" de espesor en México sería de 84.8 kg CO₂e/m².

Tomando en cuenta lo anterior, las emisiones de GEI atribuibles al uso del cimbraplay en México se puede calcular como el promedio ponderado de los factores de emisión del cimbraplay según su lugar de fabricación.

$$\text{FET} = 0.6621 * 7.3 + 0.3379 * 84.8 = 33.49 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2.$$

6.4.11 Aluminio.

Unidad Funcional: Un kg de aluminio.

Se calcula el factor de emisiones de GEI con base en las siguientes consideraciones:

- Se toma el factor de emisiones de producción primaria del aluminio propuesta por Norgate et al (2006): 22.4 kg CO₂e/kg Al.
- Se toma el factor de emisiones de GEI para la producción secundaria (aluminio reciclado) calculado con el método Input-Output en el programa de cómputo EIO-LCA: 6.83 kg CO₂e/kg Al.
- Se estima que la proporción de la producción del aluminio reciclado al total producido en los Estados Unidos en el año 2007 fue del 33.33% (Lee B, 2008) por lo que el factor de emisiones de GEI ponderadas sería igual a: $22.4 * 0.6667 + 6.83 * 0.3333 = 17.21 \text{ kg CO}_2\text{e/kg Al}.$

Por lo que el factor de emisiones de GEI a considerar en los cálculos será:

$$\text{FET} = 17.21 \text{ kg CO}_2\text{e/kg Al}.$$

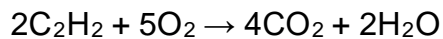
6.4.12 Acetileno.

Unidad Funcional: Un kilogramo de acetileno.

Alcances: 1, 2 y 3.

Las emisiones correspondientes al Alcance 1, se calculan considerando la combustión del acetileno durante su utilización en los procesos de corte y soldadura.

El acetileno es un compuesto de carbono cuya fórmula química es: C_2H_2 y debido a las altas temperaturas que alcanza en su combustión (hasta 3,000 °C) se emplea en trabajos de corte de metales. Durante su combustión completa se genera CO_2 de acuerdo a la siguiente ecuación estequiométrica:



Si esto se pone en términos de sus pesos tendremos que en la reacción intervienen 52 gramos de acetileno más 160 gramos de oxígeno, produciendo 176 gramos de bióxido de carbono más 36 gramos de agua, liberando energía en el proceso. De esta ecuación se tiene que la combustión completa del acetileno produce 3.385 gramos de CO_2 por cada gramo de acetileno. Se asume que estas emisiones son atribuibles al acetileno únicamente, por lo que en el cálculo de las emisiones del oxígeno líquido empleado en el proceso de corte de metales, no se considerarán las emisiones por combustión.

Las emisiones correspondientes al consumo de energía eléctrica y demás procesos, se estiman empleando el método Input-Output. Se considera un precio del acetileno en 2003 de \$166.83 por kilogramo. Se obtienen emisiones de 4.182 kg CO_2e/kg de acetileno.

El factor de emisiones totales es de 7.567 kg CO_2e/kg C_2H_2 .

6.4.13 Factores de emisión de GEI de materiales tomadas de otras fuentes.

Tabla No. 44: Factores de emisión de materiales según fuentes diversas.

Material	Unidad Funcional	Factor de Emisión (kg CO ₂ e/U.F.)	Fuente	Consideraciones
Cobre	kg	14.8	BEDEC	
PVC	kg	2.95	Franklin Associates	
Cables de Cu recubiertos cal 8, 10, 12 y 14	m	1.431 0.880 0.5831 0.3902	BEDEC	Se suman las emisiones por Cu y PVC.
Calhdra	kg	1.6	AP-42	
Poliestireno Expandido	m ³	125.12	Ross y Evans (2003)	Para una densidad de 17 kg/m ³ .
Recubrimientos de cerámica	m ²	0.48	Hammond y Jones (2008)	
Vidrios	kg	1.25	Carrillo V., Pflieger J., Sun T. 2010.	
Acero galvanizado	kg	3.13	BEDEC	

6.5 Emisiones de GEI por materiales empleados en la obra.

6.5.1 Edificio San Juan.

Se agruparon los materiales según sus tipos, éstas sumas fueron divididas entre el área de edificación, obteniéndose los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla No. 45 Emisiones de GEI por materiales del edificio San Juan.

TIPO DE MATERIAL	EMISIONES DE GEI (kg CO ₂ e/m ²)
CEMENTOS, MORTEROS, AGREGADOS, MATERIAL DE BANCO, AGUA Y CONCRETOS	133.66
ACEROS	46.98
PRODUCTOS CERÁMICOS	16.57
PINTURAS, QUÍMICOS Y RECUBRIMIENTOS	4.72
PRODUCTOS DE COBRE	5.45
PRODUCTOS METÁLICOS	4.39
PRODUCTOS PLÁSTICOS	8.46
PRODUCTOS DE ALUMINIO	4.61
MATERIAL ELÉCTRICO	13.77
PRODUCTOS DE MADERA	2.26
PRODUCTOS DE VIDRIO	4.08
OTROS	0.12

Estos resultados se presentan en la Figura No. 11.

Desagregando al cemento del rubro del primer rubro, tenemos que se emite un total de 76,354 kg CO₂e por la edificación de cada edificio tipo, lo que implica emisiones de 111.14 kg CO₂e/m². Las emisiones atribuibles al uso del cemento implican el 45.35 % del total de las emisiones por materiales en la etapa de edificación. Por otra

parte al cemento le corresponde el 15.54 % del total de las emisiones de GEI por metro cuadrado de edificación de este tipo de edificios.

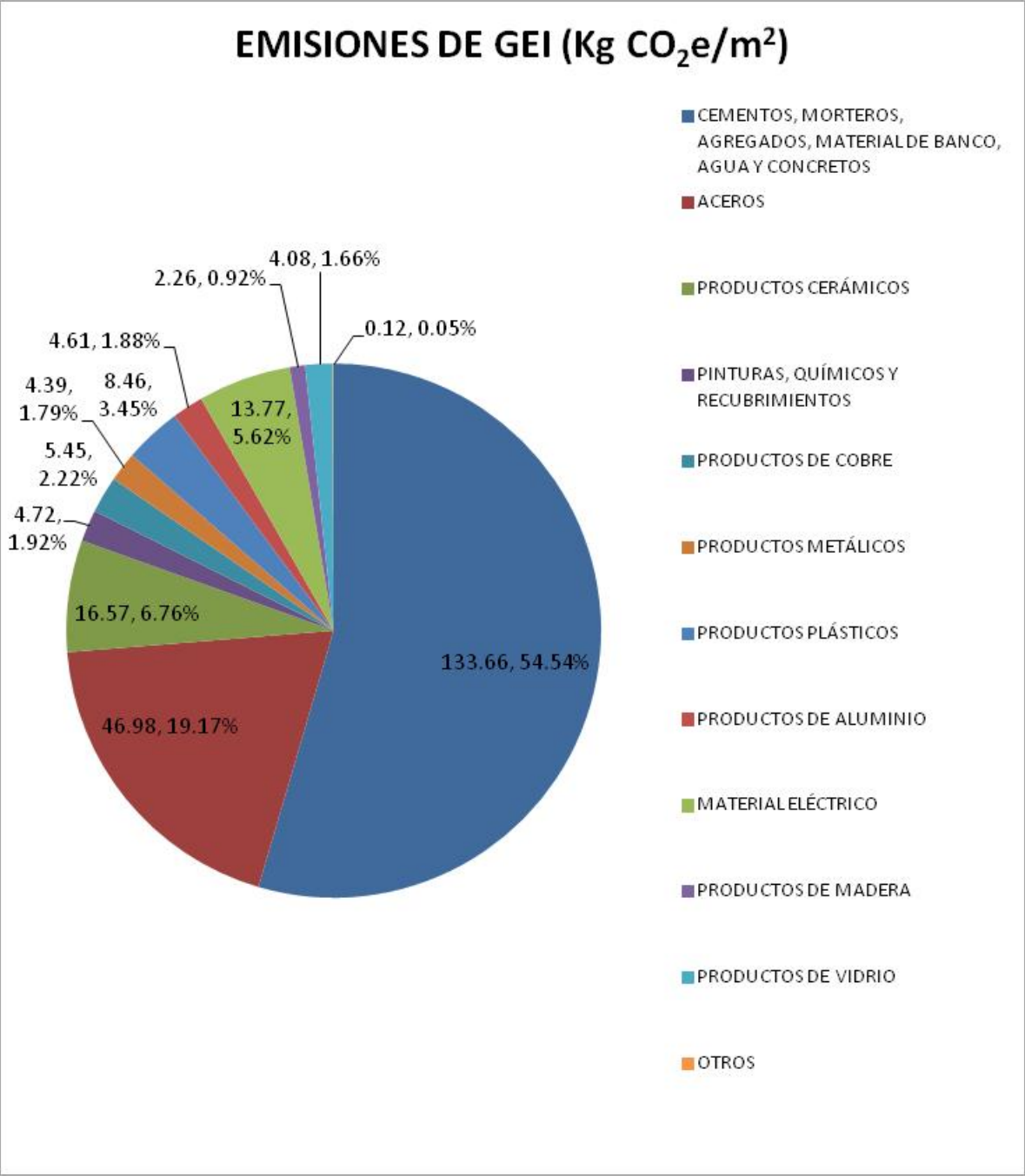


Figura No 11: Emisiones de GEI por materiales del edificio San Juan.

6.5.2 Edificio Los Poetas.

Las emisiones por metro cuadrado de edificación (sin considerar la etapa de mantenimiento), por tipo de materiales, son:

Tabla No. 46: Emisiones de GEI por materiales del edificio Los Poetas.

TIPO DE MATERIAL	EMISIONES DE GEI (kg CO ₂ e/m ²)
CEMENTOS, MORTEROS, AGREGADOS, BLOQUES, MATERIAL DE BANCO, AGUA Y CONCRETOS	114.16
ACEROS	70.62
PRODUCTOS DE MADERA	31.81
PRODUCTOS CERÁMICOS	22.25
PINTURAS, QUÍMICOS Y RECUBRIMIENTOS	11.74
PRODUCTOS DE VIDRIO	6.88
MATERIAL ELÉCTRICO	6.61
PRODUCTOS PLÁSTICOS	6.11
PRODUCTOS METÁLICOS	3.47
PRODUCTOS DE COBRE	3.26
OTROS	2.99
PRODUCTOS DE ALUMINIO	1.15

De las emisiones por metro cuadrado atribuibles a los materiales, al cemento le corresponde el 37.93 % de las emisiones por materiales durante la etapa de edificación, contribuyendo con 115.66 kg CO₂e/m² durante la edificación.

Las emisiones de GEI por el cemento representan el 15.08 % de las emisiones totales de GEI del edificio analizado.

De manera gráfica estos resultados son los siguientes:

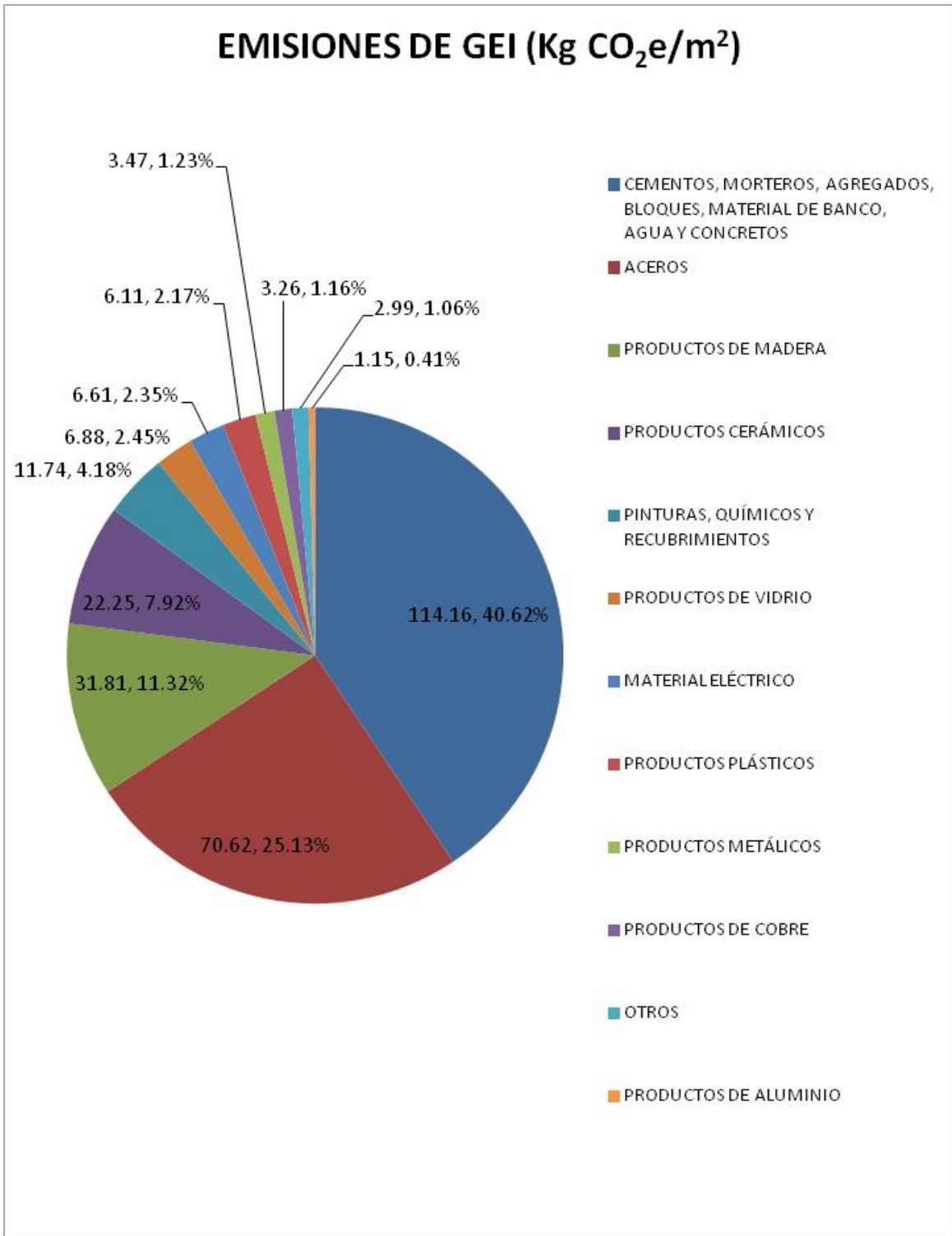


Figura No. 12: Emisiones de GEI por materiales del edificio Los Poetas.

Edificio Real del Bosque.

Las emisiones debidas a los materiales empleados en la edificación, sin considerar el reemplazo de los mismos durante el mantenimiento son:

Tabla No. 47 Emisiones por materiales del edificio Real del Bosque.

TIPO DE MATERIAL	EMISIONES DE GEI (kg CO ₂ e/m ²)
CEMENTOS, MORTEROS, AGREGADOS, MATERIAL DE BANCO, AGUA Y CONCRETOS	164.86
PRODUCTOS DE MADERA	84.54
ACEROS	28.44
PRODUCTOS PLÁSTICOS	15.68
PRODUCTOS CERÁMICOS	14.79
MATERIAL ELÉCTRICO	8.66
PRODUCTOS DE VIDRIO	5.81
PINTURAS, QUÍMICOS Y RECUBRIMIENTOS	5.69
PRODUCTOS METÁLICOS	3.95
OTROS	3.84
PRODUCTOS DE COBRE	1.75
PRODUCTOS DE ALUMINIO	0.65

Al cemento se le puede atribuir la mayor contribución en las emisiones de GEI, ya que es responsable del 37.37 % de las emisiones por materiales durante la edificación. Al cemento le corresponden 126.55 kg CO₂e/m² de edificación, esto representa el 15.01% de las emisiones totales de GEI (843 kg CO₂e/m²) correspondientes a la edificación, mantenimiento y cambio en el uso del suelo.

Estos resultados se presentan en la siguiente gráfica:

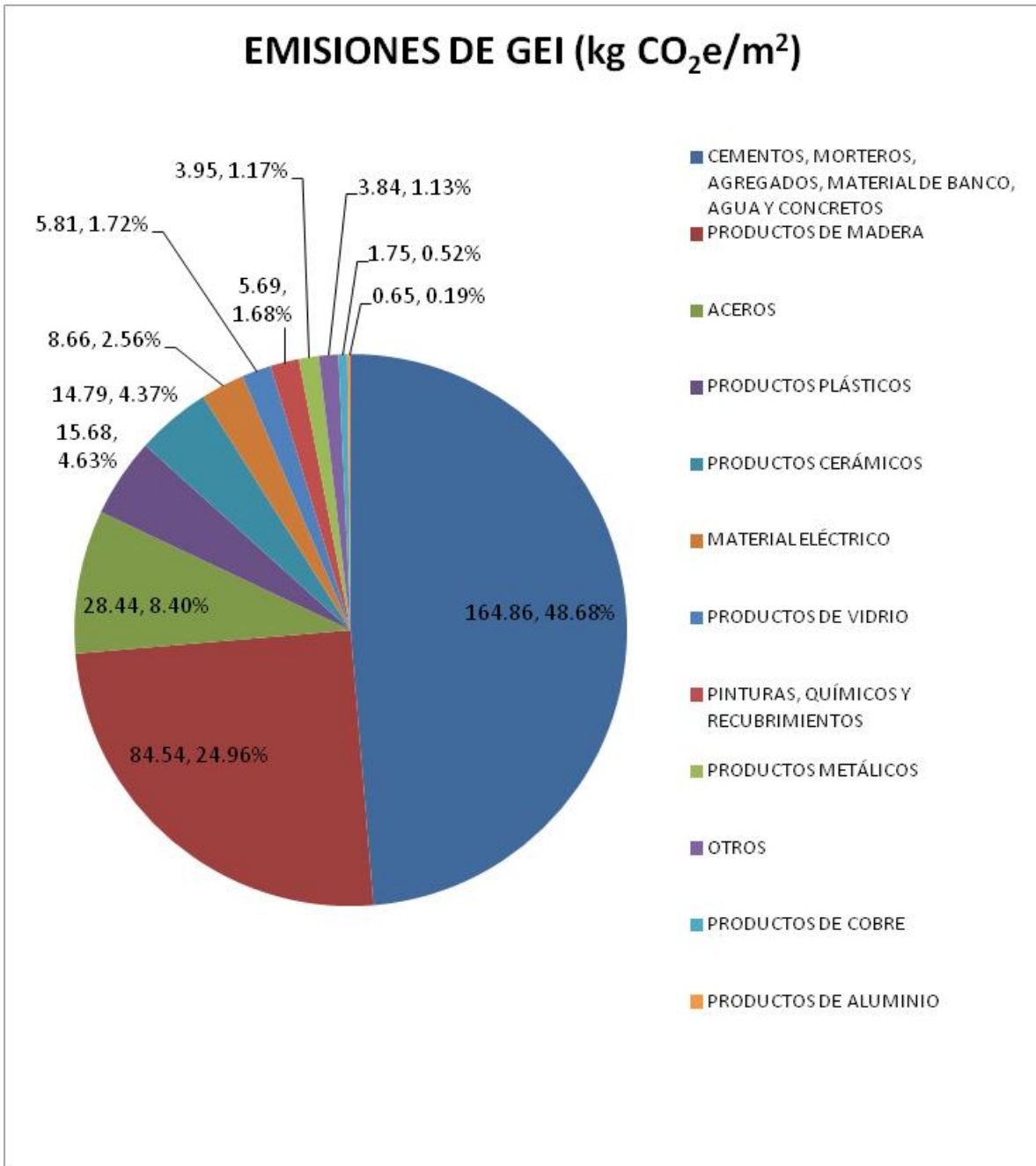


Figura No. 13: Emisiones de GEI por materiales del edificio Real del Bosque.

6.6 Emisiones de GEI por cambios en el uso del suelo.

Se calcularon las emisiones de GEI siguiendo el procedimiento determinado en la metodología. Las emisiones de GEI calculadas son las siguientes:

6.6.1 Edificio San Juan.

Área de edificación:	687.00 m ²
Área de estacionamiento:	216 m ²
Área de comunicación peatonal:	60 m ²
Área de calles:	95 m ²
A _{total} :	1,058.00 m ²

Tipo de vegetación:	Selva subcaducifolia
Contenido de carbono por hectárea:	222 tC/ha
Pérdida de carbono:	23.49 tc

Emisiones de GEI por cambio en el uso del suelo:	86,121 kg CO ₂ e
--	-----------------------------

6.6.2 Edificio Los Poetas.

Área de edificación:	214.32 m ²
Área de estacionamiento:	72 m ²
Área de comunicación peatonal:	12 m ²
Área de calles:	60 m ²
A _{total} :	358.32 m ²

Tipo de vegetación:	Selva subcaducifolia
Contenido de carbono por hectárea:	222 tC/ha
Pérdida de carbono:	7.95 tc

Emisiones de GEI por cambio en el uso del suelo:	29,167 kg CO ₂ e
--	-----------------------------

6.6.3 Edificio Real del Bosque.

Área de edificación:	211.27 m ²
Área de estacionamiento:	63.612 m ²
Área de comunicación peatonal:	7.068 m ²
Área de calles:	60 m ²
A _{total} :	341.95 m ²

Tipo de vegetación:	Selva subcaducifolia
Contenido de carbono por hectárea:	222 tC/ha
Pérdida de carbono:	7.59 tc

Emisiones de GEI por cambio en el uso del suelo: 27,835 kg CO₂e

6.7 Emisiones de GEI por actividades de administración de las obras.

Las emisiones de GEI para los tres edificios analizados por las actividades de administración de las obras se estiman siguiendo la metodología usual en el análisis de costos, calculando las emisiones por este concepto como un porcentaje de las emisiones directas de la obra. Para esto se suponen datos de las obras de acuerdo a referencias técnicas especializadas (Suárez, 1997). Se considera que una obra emite por las actividades directas (incluyendo los procesos de los materiales, mano de obra y equipos) 228,994 kg CO₂e, para el tamaño de la empresa se considera que en un período de 90 días esa empresa hipotética edifica 6 edificios tipo. Los cálculos resultantes son los siguientes:

CÁLCULO DE LAS EMISIONES DE GEI POR LAS ACTIVIDADES INDIRECTAS DE OBRA

Volumen de Obra:	\$9,000,000.00
Plazo de ejecución:	90 días
Factor 2010-2003:	0.7397452
Emisiones directas de una obra:	228994 kg CO ₂ e
Emisiones directas del período:	1373962 kg CO ₂ e

INDIRECTOS CENTRALES

Administración central

	Importe 2010	Decil de la población	FE	Emisiones
Gerente General	\$135,000.00	10	0.1172	15822.00 kg CO ₂ e
Secretaría	\$15,300.00	8	0.1424	2178.72 kg CO ₂ e

Chofer	\$15,300.00	8	0.1424	2178.72	kg CO ₂ e
Programador	\$27,000.00	8	0.1424	3844.80	kg CO ₂ e
Velador	\$13,500.00	4	0.1736	2343.60	kg CO ₂ e
Contador	\$36,000.00	9	0.1306	4701.60	kg CO ₂ e
Intendente	\$13,500.00	4	0.1736	2343.60	kg CO ₂ e
SUMA:	\$255,600.00			33413.04	kg CO ₂ e

Depreciaciones

			Sector	FE	Emisiones
Renta	\$45,000.00	\$33,288.53	11	0.086462	2,878.21 kg CO ₂ e
Luz	\$15,000.00	\$11,096.18	9	0.718771	7,975.61 kg CO ₂ e
Agua	\$1,500.00	\$1,109.62	10	1.424933	1,581.13 kg CO ₂ e
Teléfono	\$15,000.00	\$11,096.18	51	0.037089	411.54 kg CO ₂ e
Mantenimiento	\$6,000.00	\$4,438.47	11	0.086462	383.76 kg CO ₂ e
Depreciaciones y amortizaciones	\$30,000.00	\$22,192.36	30	0.087135	1,933.73 kg CO ₂ e
SUMA:	\$112,500.00	\$83,221.33		SUMA	15,163.98 kg CO ₂ e

Seguros

Seguros de vehículos	\$4,000.00	\$2,958.98	57	0.013030	38.55 kg CO ₂ e
SUMA:	\$4,000.00	\$2,958.98		SUMA:	38.55 kg CO ₂ e

Consumos

Papelería	\$5,000.00	\$3,698.73	21	0.099591	497.96 kg CO ₂ e
Combustibles	\$20,000.00	\$14,794.90	Calc. propio	0.286300	5726.00 kg CO ₂ e
Artículos de Limpieza	\$3,000.00	\$2,219.24	24	0.100570	301.71 kg CO ₂ e
Varios	\$3,000.00	\$2,219.24	34	0.083367	250.10 kg CO ₂ e
SUMA:	\$31,000.00	\$22,932.10		SUMA:	6775.77 kg CO ₂ e

SUMA TOTAL:	\$403,100.00	\$298,191.28		SUMA TOTAL:	55391.34 kg CO ₂ e
-------------	--------------	--------------	--	-------------	-------------------------------

Porcentaje de indirectos por oficinas centrales (dinero):	4.47889%
Porcentaje de indirectos por oficinas centrales (GEI):	4.03150%

INDIRECTOS DE CAMPO:

Monto de la Obra: \$1,500,000.00

Gastos Técnicos y Administrativos.

	Importe	Decil de la población	FE	EMISIONES
Residente	\$36,000.00	10	0.1172	\$4,219.20 kg CO ₂ e
Almacenista	\$22,500.00	9	0.1306	\$2,938.50 kg CO ₂ e
Chofer	\$15,300.00	8	0.1424	\$2,178.72 kg CO ₂ e
Velador	\$15,300.00	8	0.1424	\$2,178.72 kg CO ₂ e
SUMA:	\$89,100.00		SUMA:	\$11,515.14

Traslados.

Deprec. y mant. Pick Up	\$5,833.33	\$4,315.18	32	0.056707	244.70	kg CO ₂ e
Combustible	\$5,000.00	\$3,698.73	Calc. Propio	0.2863	1,058.95	kg CO ₂ e
SUMA:	\$10,833.33	\$8,013.91		SUMA:	1,303.65	kg CO ₂ e
Seguros						
Seguro Pick Up	\$666.67	\$493.16	57	0.013030	6.43	kg CO ₂ e
SUMA:	\$666.67	\$493.16		SUMA:	6.43	kg CO ₂ e
Comunicaciones.						
Telefonía.	\$1,500.00	\$1,109.62	51	0.037089	41.15	kg CO ₂ e
SUMA:	\$1,500.00	\$1,109.62		SUMA:	41.15	kg CO ₂ e
Construcciones Provisionales.						
Oficina	\$5,000.00	\$3,698.73	11	0.086462	319.80	kg CO ₂ e
Bodega	\$10,000.00	\$7,397.45	11	0.086462	639.60	kg CO ₂ e
Letrina	\$5,000.00	\$3,698.73	11	0.086462	319.80	kg CO ₂ e
Accesos	\$5,000.00	\$3,698.73	12	0.086462	319.80	kg CO ₂ e
SUMA:	\$25,000.00	\$18,493.63		SUMA:	1599.00	kg CO ₂ e
Consumos.						
Papelería	\$1,500.00	\$1,109.62	21	0.099591	149.39	kg CO ₂ e
SUMA:	\$1,500.00	\$1,109.62		SUMA:	149.39	kg CO ₂ e
SUMA TOTAL:	\$128,600.00	\$95,131.23		SUMA TOTAL:	14614.76	kg CO ₂ e

Porcentaje de Indirectos por Indirectos de Campo (\$): 8.57333%
 Porcentaje de Indirectos por Indirectos de Campo (GEI): 6.38217%

Porcentaje Total de Indirectos (\$): 13.05222%
 Porcentaje Total de Indirectos (GEI): 10.41367%

Suma total de emisiones por actividades indirectas de obra: 23847 kg CO₂e

Como resultado de este análisis se determinó que a la cantidad de emisiones resultantes de las actividades de edificación directas se le multiplique por un porcentaje de indirectos (10.41367%) para obtener las emisiones de GEI atribuibles a las actividades de administración de las obras.

6.8 Emisiones de GEI por partidas de obra.

6.8.1 Edificio San Juan.

Las emisiones de GEI agrupadas por los conjuntos de actividades similares o partidas de construcción se calcularon para dos etapas. En la primera etapa se consignan las emisiones durante la edificación, mientras que en la etapa de mantenimiento se consideran las emisiones de GEI por los reemplazos de elementos que tienen una durabilidad menor a la del edificio. Los resultados son los siguientes:

Tabla No. 48: Emisiones de GEI por partidas del edificio San Juan.

PARTIDA	EMISIONES GEI kg CO ₂ e/m ² EDIFICACIÓN	EMISIONES GEI kg CO ₂ e/m ² MANTENIMIENTO	EMISIONES GEI kg CO ₂ e/m ² TOTALES
PRELIMINARES	6.10	0.00	6.10
CIMENTACIÓN	36.56	0.00	36.56
MUROS	83.71	0.00	83.71
LOSAS	43.88	0.00	43.88
ESCALERA	6.77	0.00	6.77
INSTALACIÓN ELÉCTRICA	13.41	13.29	26.70
INSTALACIÓN HIDROSANITARIA	44.65	29.38	74.03
CANCELERÍA	21.44	0.00	21.44
ACABADOS	68.82	166.01	234.83

Estos resultados se presentan en la siguiente figura.

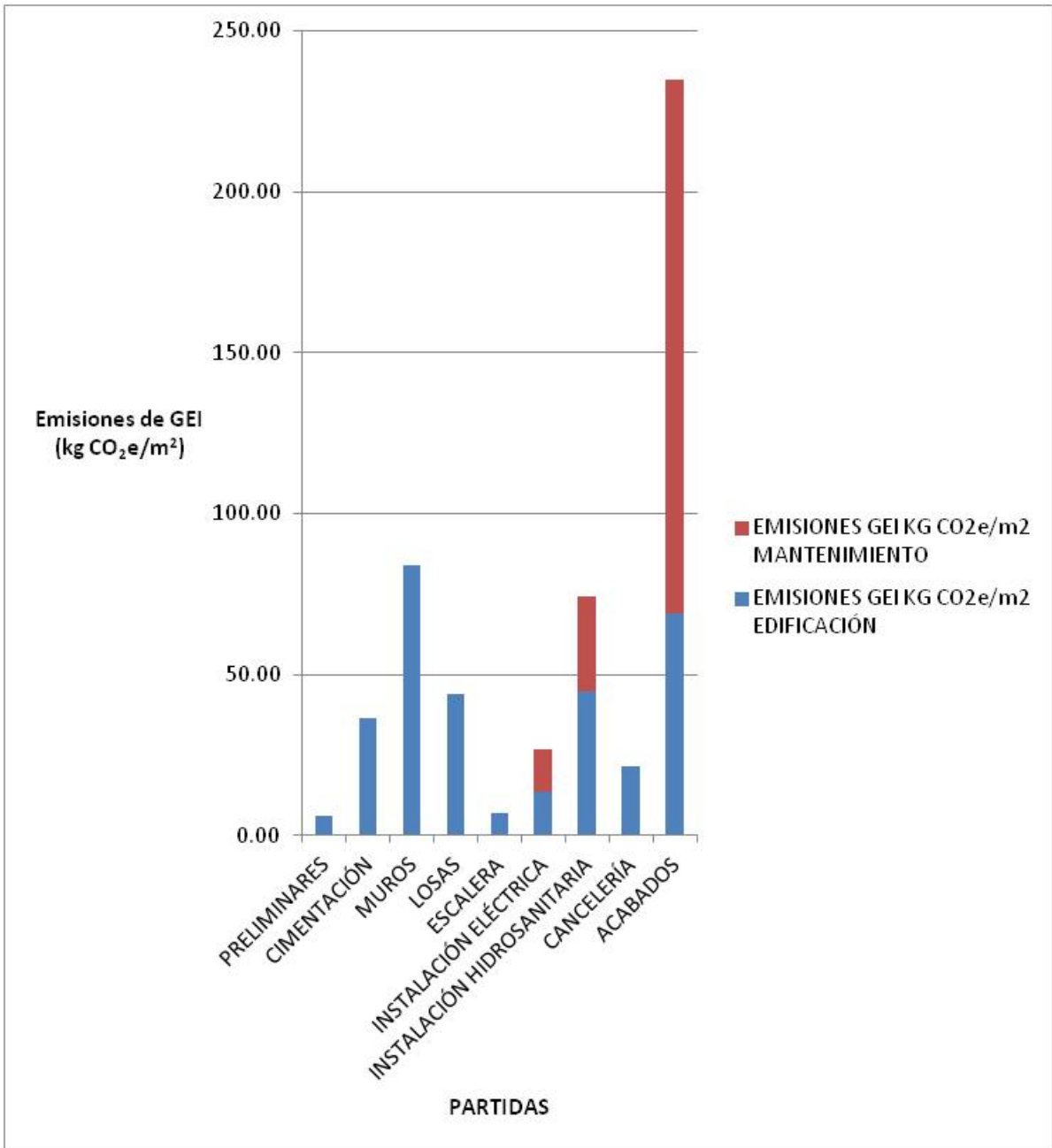


Figura No. 14: Emisiones de GEI por partidas del edificio San Juan.

6.8.2 Edificio Los Poetas.

Las emisiones de GEI por metro cuadrado de edificación, agrupadas en partidas, son las siguientes:

Tabla No. 49: Emisiones de GEI por partidas del edificio Los Poetas.

PARTIDA	EMISIONES GEI kg CO ₂ e/m ² EDIFICACIÓN	EMISIONES GEI kg CO ₂ e/m ² MANTENIMIENTO	EMISIONES GEI kg CO ₂ e/m ² TOTALES
PRELIMINARES	11.864	0.00	11.864
CIMENTACIÓN	72.769	0.00	72.769
MUROS Y TRABES	106.982	0.00	106.982
LOSAS	55.322	0.00	55.322
ESCALERA	12.152	0.00	12.152
INSTALACIÓN ELÉCTRICA	17.327	14.32	31.651
INSTALACIÓN HIDROSANITARIA	47.612	23.89	71.505
CANCELERÍA	44.059	0.00	44.059
ACABADOS (PISOS Y RECUBRIMIENTOS)	53.604	111.76	165.365
	421.69	149.98	571.67

Estos resultados se presentan en la gráfica siguiente:

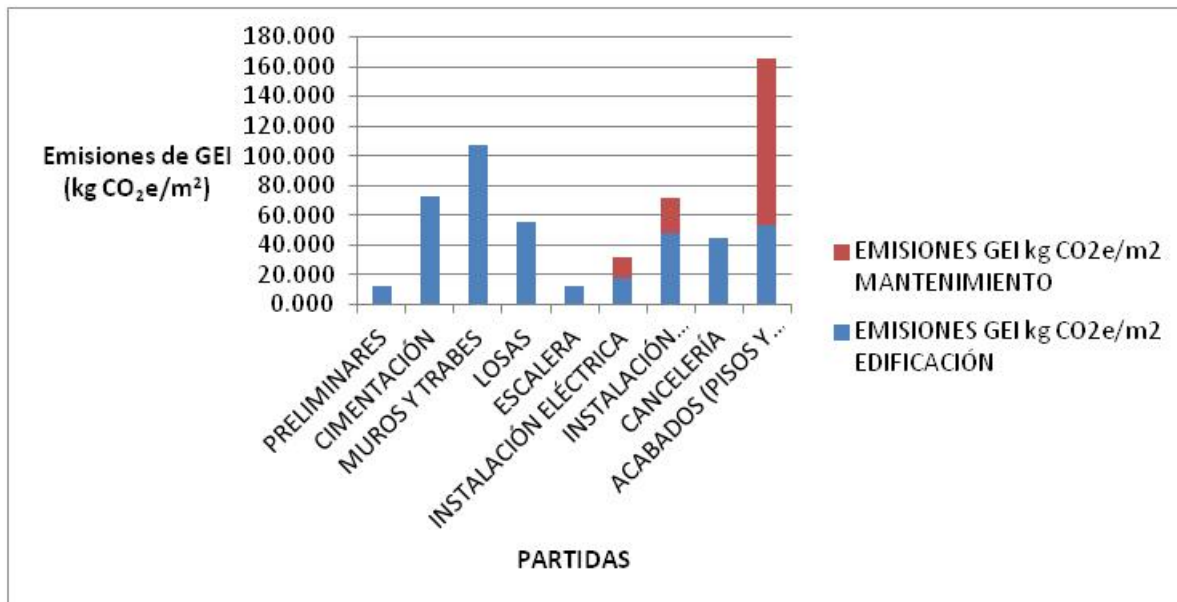


Figura No. 15: Emisiones de GEI por partidas del edificio Los Poetas.

6.8.3 Edificio Real del Bosque.

Las emisiones de GEI por edificación y mantenimiento (reemplazo de elementos constructivos durante la vida de la obra) son los siguientes:

Tabla No. 50: Emisiones de GEI por partidas del edificio Real del Bosque.

PARTIDA	EMISIONES GEI kg CO₂e/m² EDIFICACIÓN	EMISIONES GEI kg CO₂e/m² MANTENIMIENTO	EMISIONES GEI kg CO₂e/m² TOTALES
PRELIMINARES	10.475	0.00	10.475
CIMENTACIÓN	57.215	0.00	57.215
MUROS Y TRABES	115.892	0.00	115.892
LOSAS	46.376	0.00	46.376
ESCALERA	37.448	0.00	37.448
INSTALACIÓN ELÉCTRICA	20.538	1.43	21.973
INSTALACIÓN HIDROSANITARIA	40.180	26.76	66.937
CANCELERÍA	34.579	0.00	34.579
ACABADOS (PISOS Y RECUBRIMIENTOS)	157.559	95.43	252.990
	520.26	123.62	643.88

Estos resultados se presentan en la Figura No. 16:

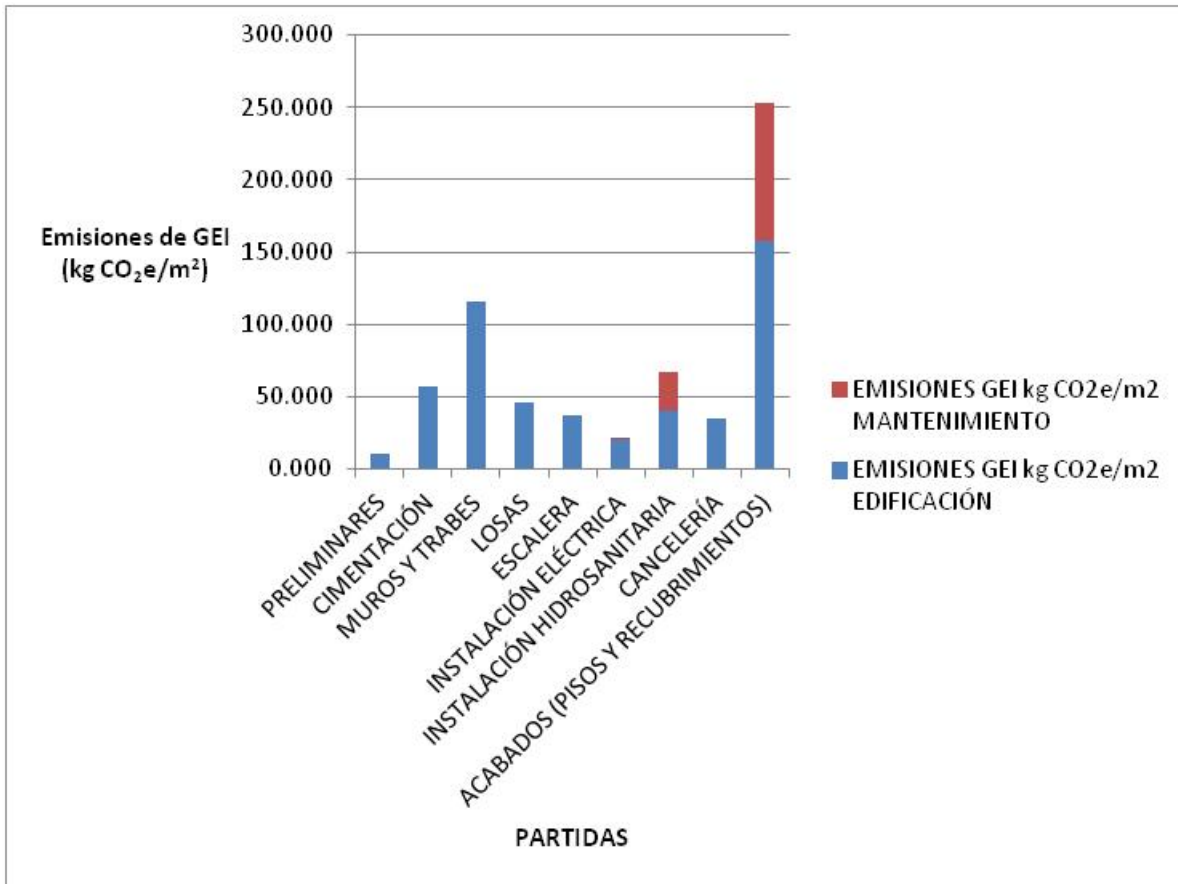


Figura No. 16: Emisiones de GEI por partidas del edificio Real del Bosque.

6.9 Emisiones totales de GEI por metro cuadrado de vivienda.

Se calcularon las emisiones totales correspondientes a la edificación, mantenimiento (reemplazo de elementos constructivos durante la vida útil de la edificación), cambios en el uso del suelo y actividades administrativas de la obra. Los resultados son los siguientes:

Para el edificio San Juan las emisiones totales por metro cuadrado de edificación se estiman en 715 kg CO₂e/M². El desglose de estas emisiones se presenta en la Figura No. 20:

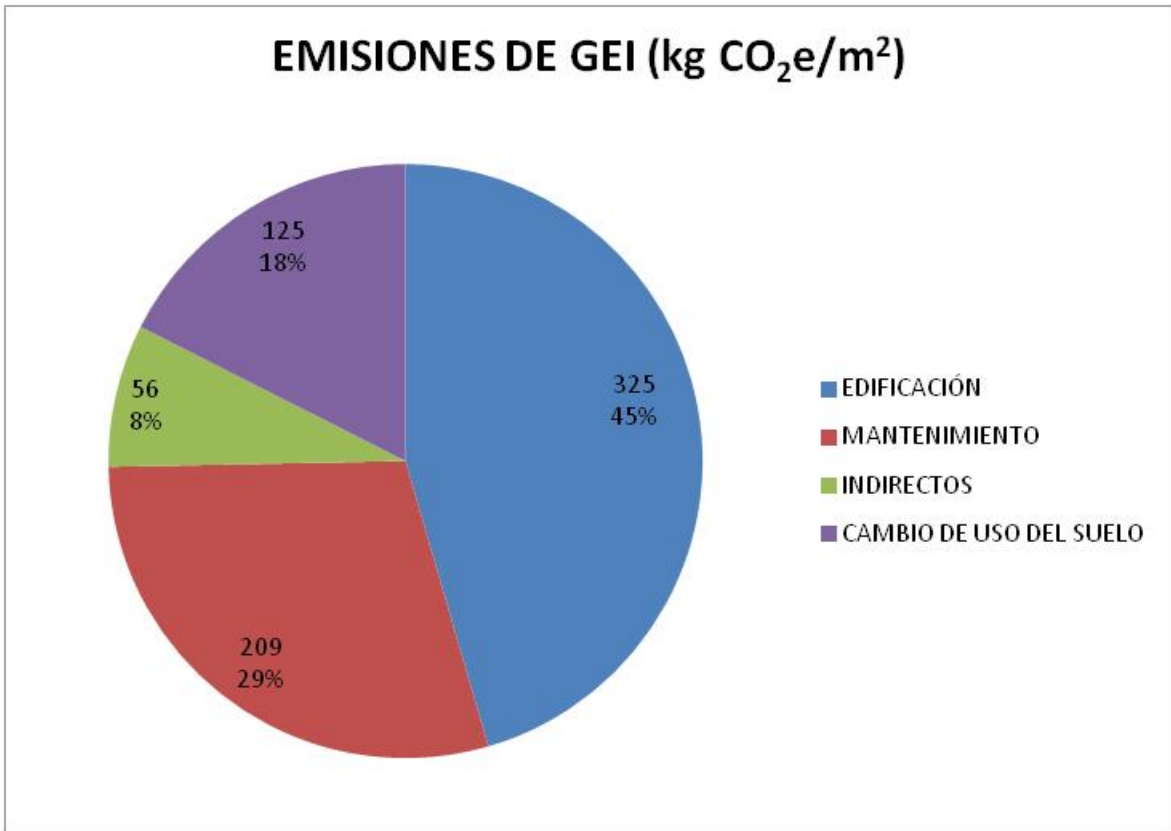


Figura No. 17: Gráfica de emisiones totales de GEI del edificio San Juan.

Para el caso del edificio Los Poetas las emisiones totales por metro cuadrado se estiman en 742 kg CO₂e/m². El desglose de estas emisiones se presenta en la Figura No. 21:

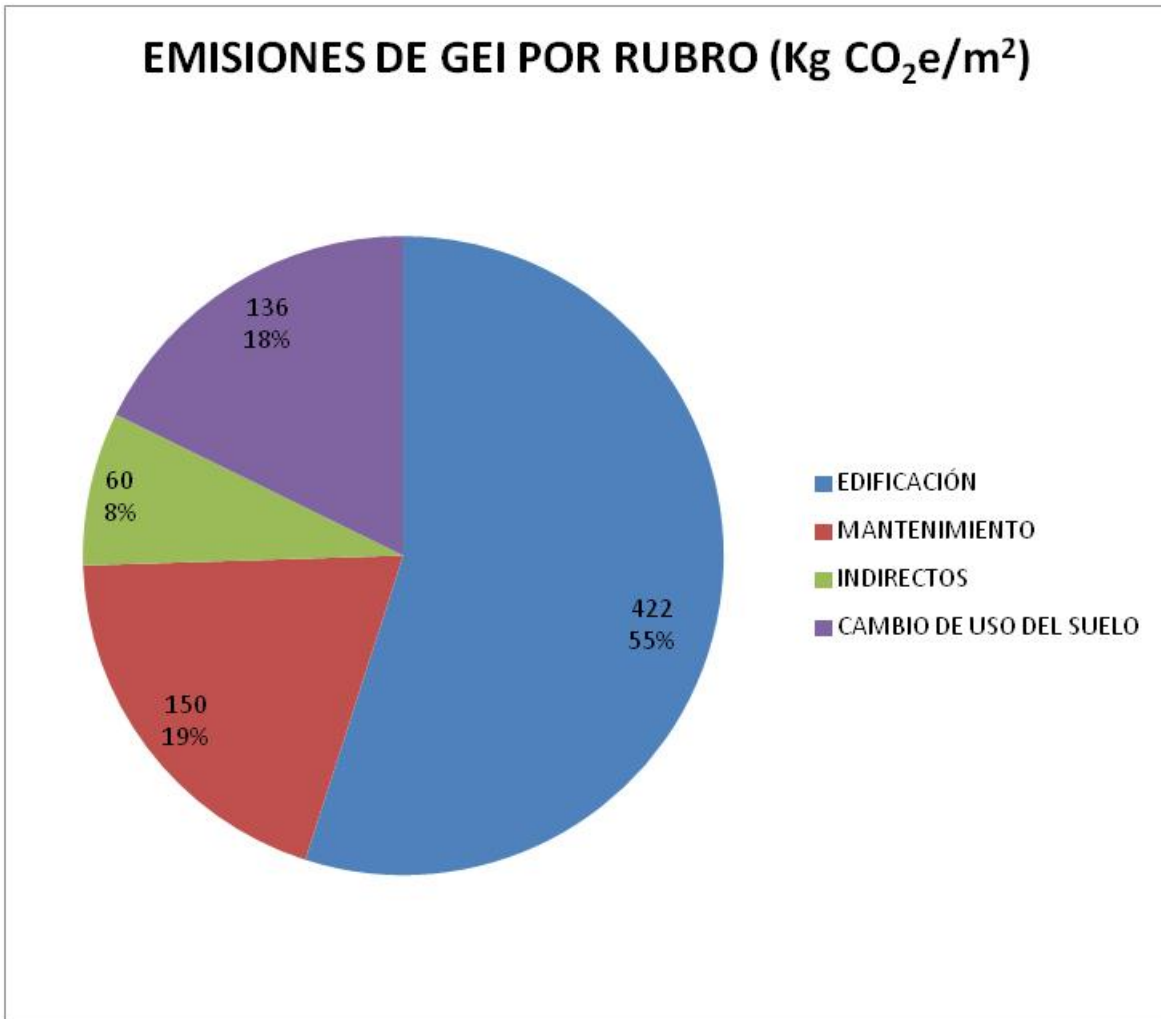


Figura No. 18: Gráfica de emisiones totales de GEI del edificio Los Poetas.

Se estimaron emisiones totales de GEI para el edificio Real del Bosque de 843 kg CO₂e/M². La participación de los rubros que componen estas emisiones se presenta en la Figura No. 21:

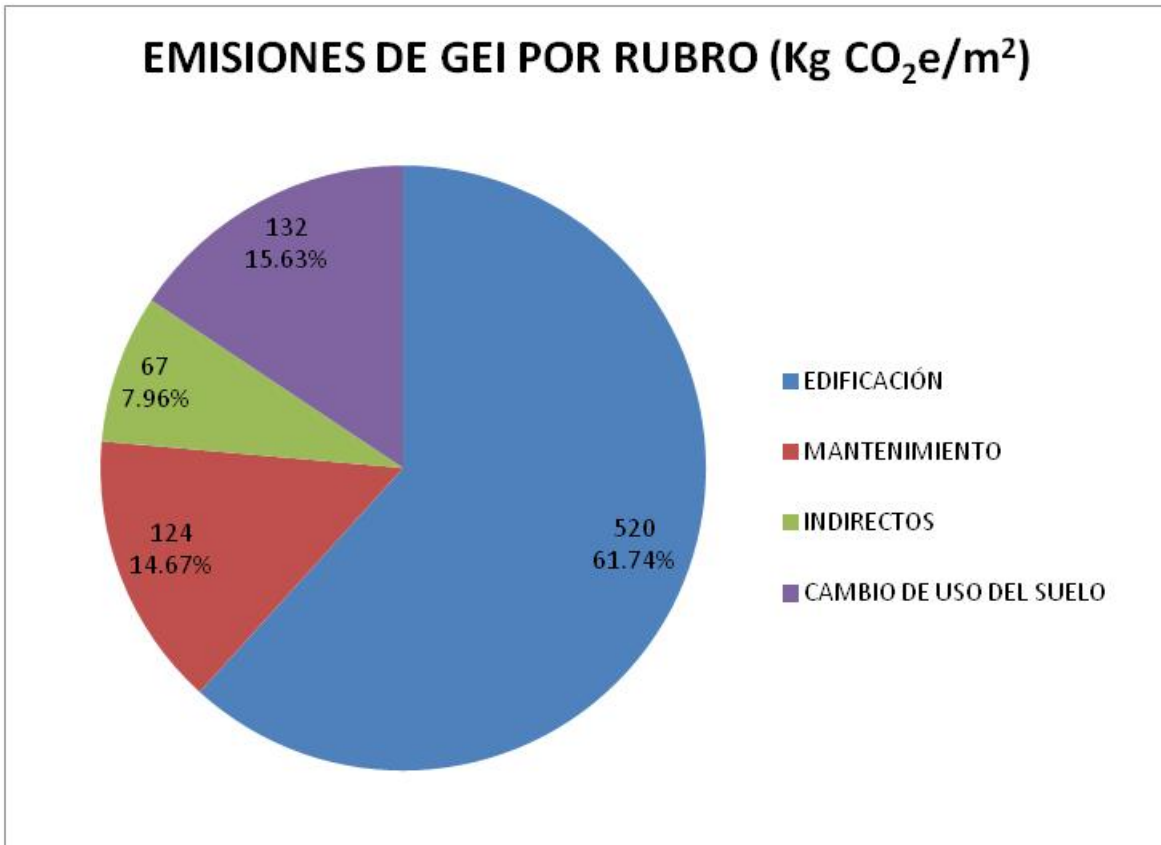


Figura No. 19: Gráfica de emisiones totales de GEI del edificio Real del Bosque.

6.10 Emisiones de GEI según el tipo de análisis empleado o la fuente de datos.

6.10.1 Edificio San Juan.

Las emisiones de GEI por materiales, mano de obra y equipos empleados en la edificación fueron agrupados de acuerdo al tipo de análisis empleado o bien a la fuente de datos del factor de emisiones de GEI empleados. La participación de los tipos de análisis se presenta en la Figura No. 22:

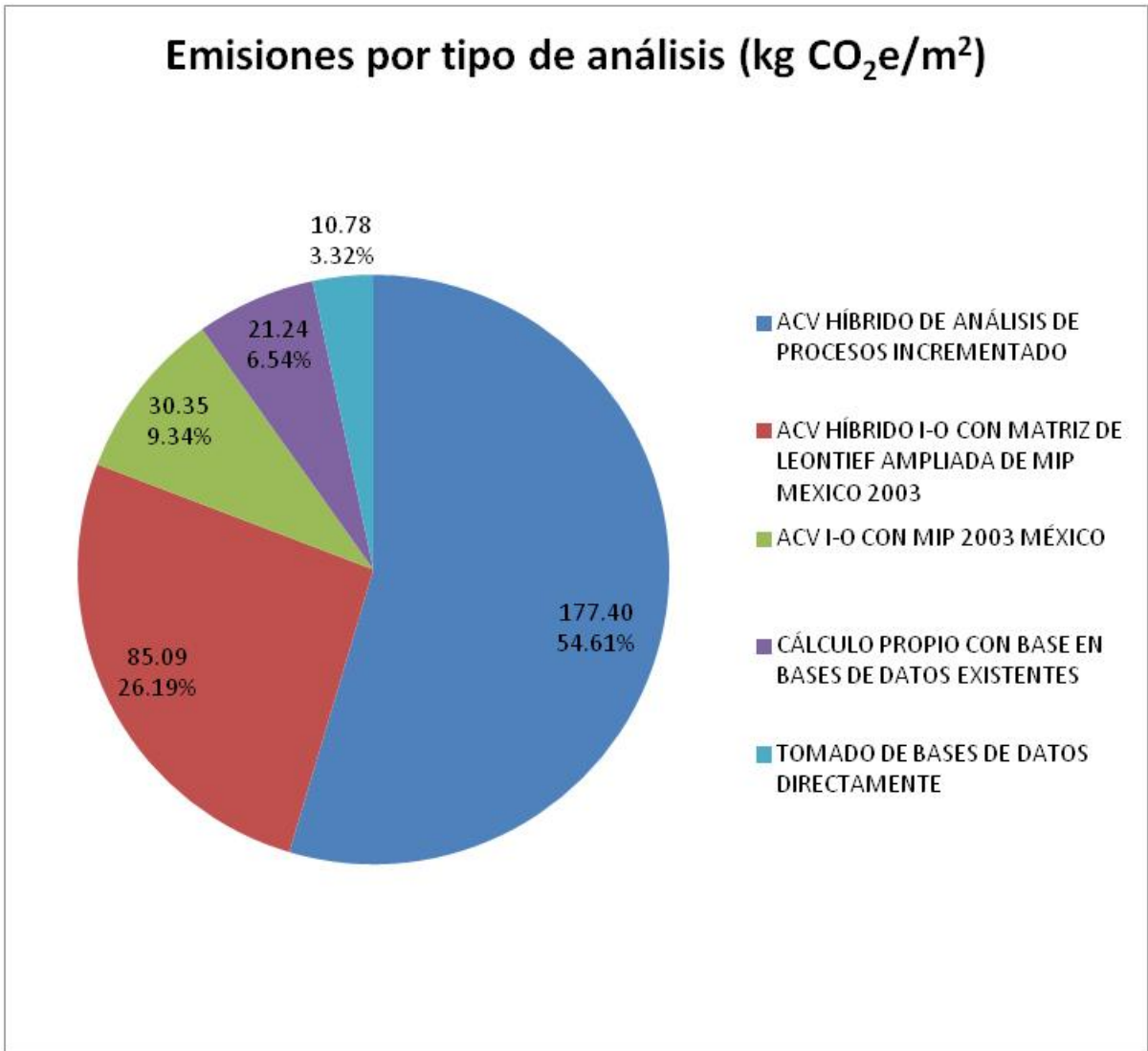


Figura No. 20: Emisiones de GEI según el tipo de análisis efectuado. Edificio San Juan.

6.10.2 Edificio Los Poetas.

Las emisiones de GEI se agruparon de acuerdo a la fuente del factor de emisiones empleado. Los resultados se presentan en la siguiente gráfica.

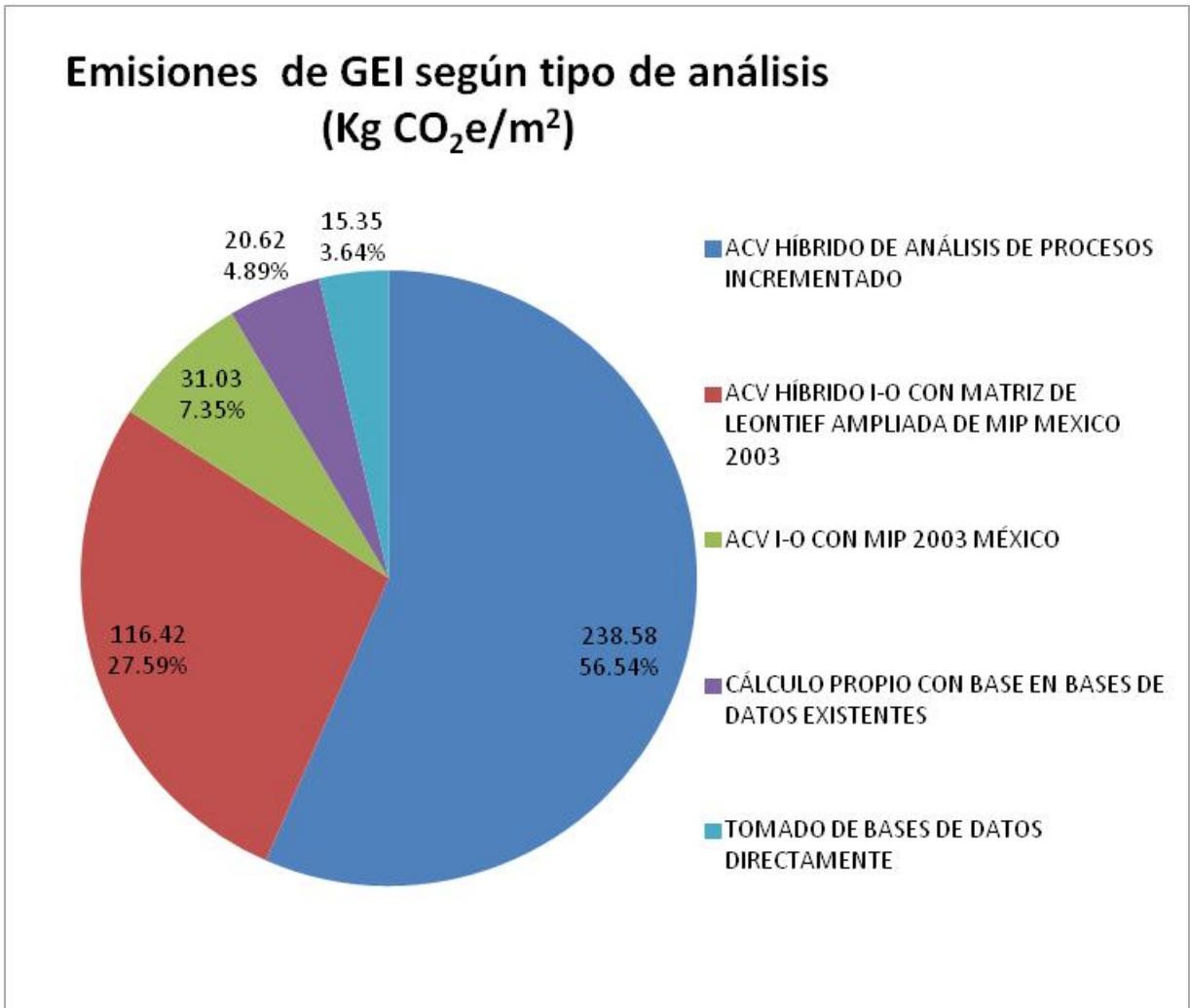


Figura No. 21: Emisiones de GEI según el tipo de análisis efectuado. Edificio Los Poetas.

6.10.3 Edificio Real del Bosque.

Las emisiones de GEI debidas a los materiales, mano de obra y equipos empleados se agruparon de acuerdo al tipo de análisis o fuente de los factores de emisiones de GEI empleados, cuantificando su participación en las emisiones de GEI. Los resultados se presentan en la Figura No. 25:

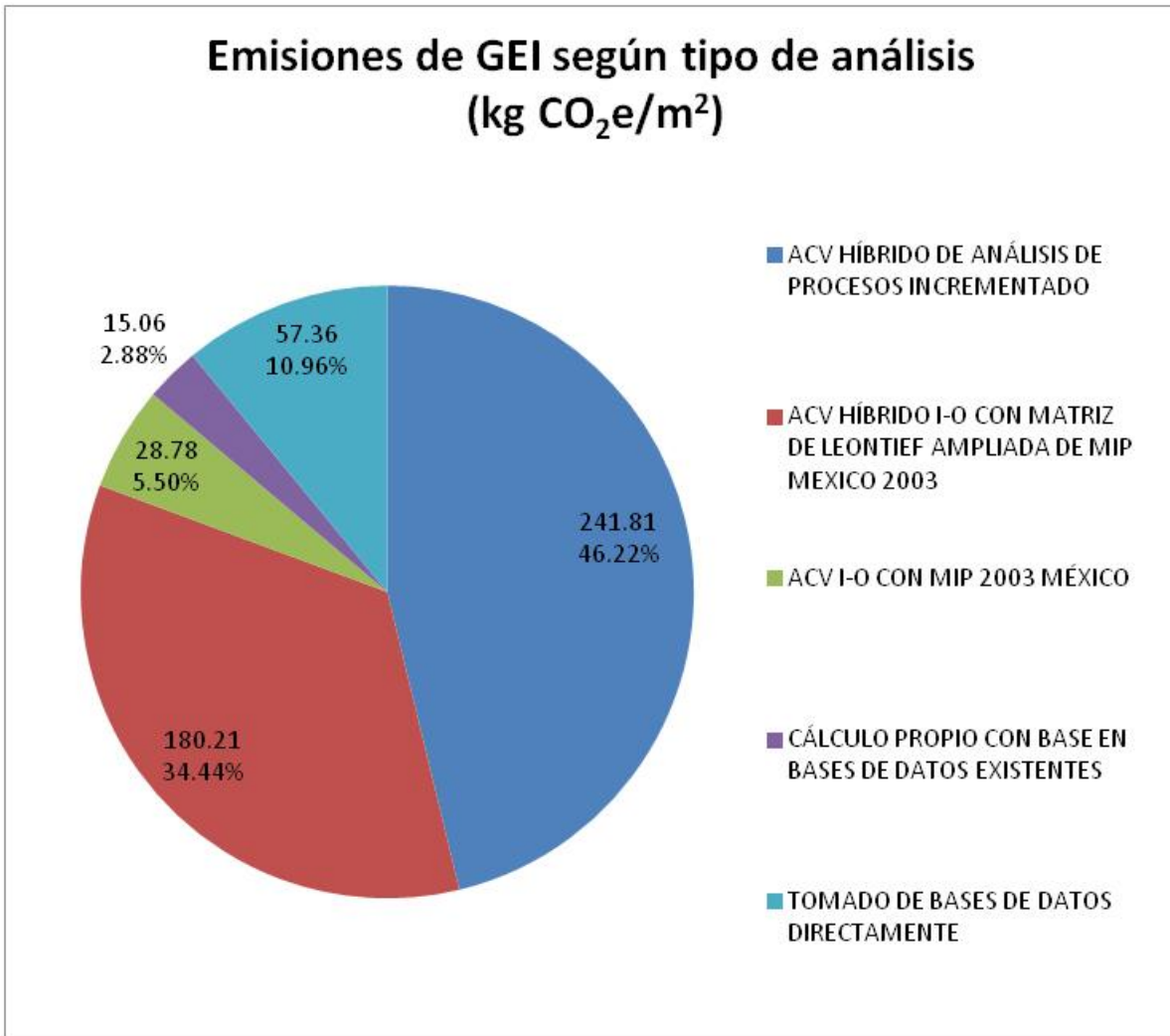


Figura No. 22: Emisiones de GEI según el tipo de análisis efectuado. Edificio Real del Bosque.

6.11 Análisis y discusión de los resultados obtenidos.

La comparación de las emisiones de GEI según los tipos de materiales empleados en los tres edificios analizados se presenta en la Figura No. 26.

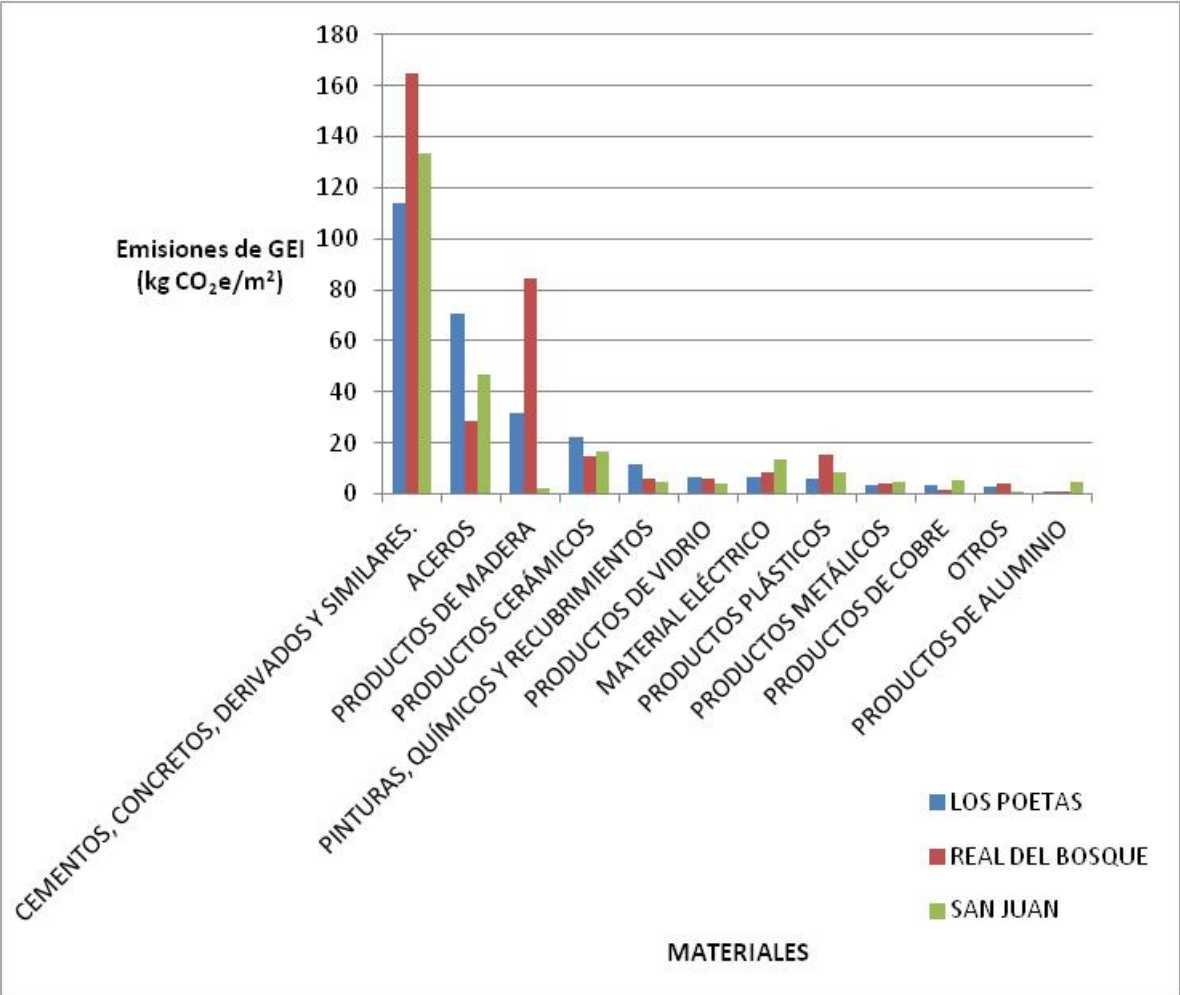


Figura No. 23: Comparativa de emisiones de GEI por materiales en los edificios analizados.

Se aprecia en esta gráfica que aunque el grupo de materiales de cementos, concretos y agregados es la primer causa de emisiones para todos los casos, el segundo lugar, corresponden a los aceros para el caso de los edificios San Juan y Los Poetas, mientras que para el caso del edificio Real del Bosque el segundo sitio lo

ocupan los productos de madera, debido a las cimbras de madera empleadas en este tipo de edificación. Esto no se aprecia de igual manera en los edificios San Juan y Los Poetas debido al empleo de cimbras de acero que son mucho menos impactantes que las correspondientes de madera. Se aúna a este efecto el hecho de que el consumo de aceros por metro cuadrado de edificación es menor en el caso del edificio Real del Bosque, que en los otros dos casos.

La comparativa de las emisiones por partidas por metro cuadrado de edificación, se presenta en la Figura No. 27, en esta gráfica se aprecia un comportamiento bastante uniforme, con excepción de la partida de acabados y recubrimientos, en el que el edificio Real del Bosque muestra una mayor participación en las emisiones. De la revisión de estas emisiones se encuentra que la causa de esta fuerte diferencia se debe a que los muros de bloques de concreto son recubiertos con mortero de cemento-cal-arena, al que le corresponde la mayor parte (56.16%) de las emisiones por el concepto de acabados y recubrimientos de este grupo. Los muros de los edificios San Juan y Los Poetas fueron construidos con acabado aparente, por lo que su único recubrimiento es pintura.

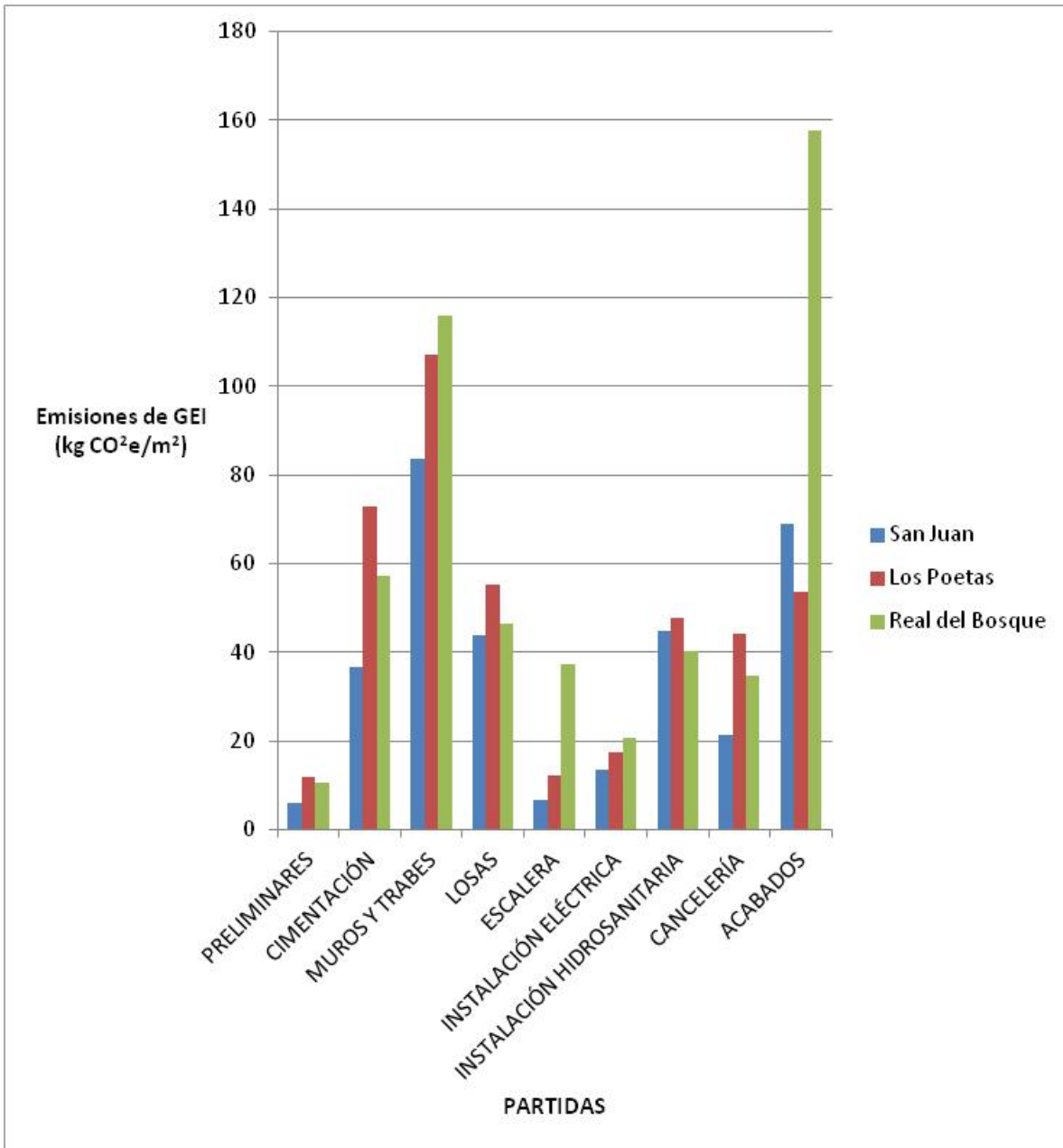


Figura No. 24: Comparativa de emisiones de GEI por partidas en los edificios analizados.

La comparación de los tipos de análisis o fuente de datos se presenta en la gráfica siguiente:

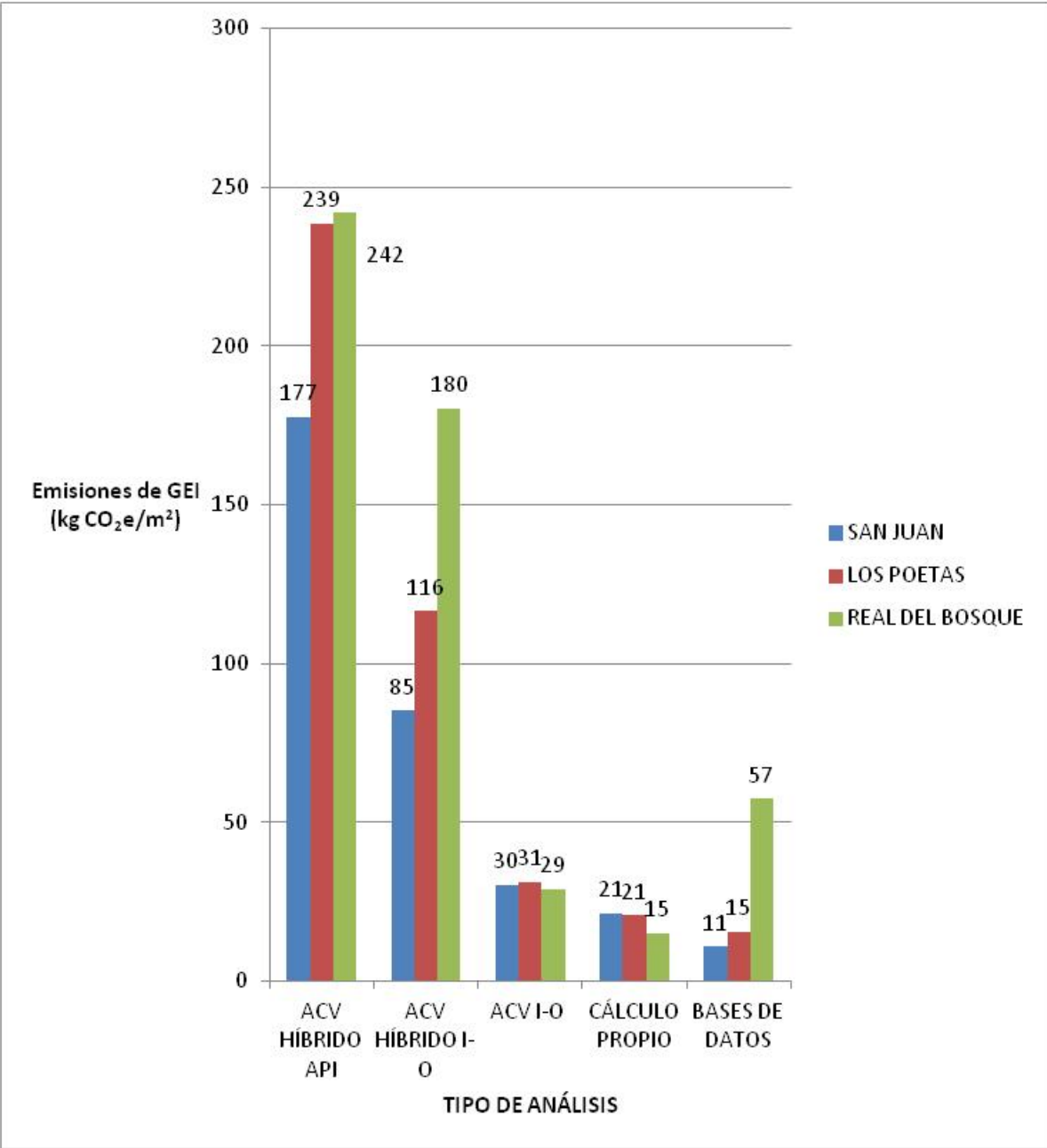


Figura No. 25: Comparativa de emisiones de GEI en los edificios analizados según el tipo de análisis empleado.

Se aprecia en esta gráfica, de acuerdo a los fines que se han buscado en esta tesis, que los datos de emisiones obtenidos mediante el análisis de ciclo de vida híbrido de análisis de procesos incrementado fue el método que permitió la estimación de la mayor parte de las emisiones, seguido por el análisis de ciclo de vida híbrido por medio de la Matriz de Leontief Ampliada con el subsector de Mano de Obra. El resto de las emisiones de GEI fue estimado mediante la aplicación directa del método Input-output con la Matriz Inversa de Leontief aplicada a la economía mexicana del año 2003, con una participación un poco menor se tiene la estimación de emisiones mediante cálculos propios derivados de bases de datos existentes y por último la estimación de emisiones de GEI mediante la aplicación directa de factores de emisión tomados de bases de datos existentes. Esta gráfica permite comparar la obtención de datos de emisiones según la calidad de estos datos. Si se jerarquizan los métodos de análisis, los métodos más precisos son los métodos híbridos que permiten conocer con mayor precisión las emisiones de GEI por unidad funcional debido a que toman en cuenta la mayor parte de las emisiones que ocurren en los procesos, disminuyendo los errores por truncación en el análisis, a la vez que se disminuyen los errores por agrupación que el método Input-Output puro introduce en su análisis al considerar grandes grupos de productos dentro de un mismo sector de la economía. Las emisiones calculadas con base en datos existentes tienen como fundamento el análisis que otros investigadores y agencias han efectuado, sin embargo pueden presentar variaciones importantes que dependen de los alcances, fronteras y métodos de cada análisis.

De los edificios analizados se puede apreciar que las diferencias en los criterios de edificación se traducen en diferencias en las emisiones de GEI. Esto es evidente en cuanto a los siguientes factores:

- a. Las emisiones por cambio en el uso de suelo por metro cuadrado de edificación son importantes en cuanto a las emisiones por edificación, presentando diferencias en los casos analizados, siendo ligeramente mayores en los edificios de dos niveles que en los de tres niveles, al pasar de 125 kg CO₂/m² para el edificio San Juan (tres niveles) a 136 kg CO₂/m² y 132 kg CO₂/m² en Los Poetas y Real del Bosque (dos niveles) respectivamente. El empleo de edificios de hasta cuatro niveles se permite (según el Art. 227 del Reglamento de Construcciones de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas) sin necesidad de disponer de elevadores, por lo que este es un límite práctico de altura para los edificios²⁰, en cuanto a las emisiones de GEI se refiere, ya que si se opta por construir edificios de más niveles esto obligaría al consumo de energía y las correspondientes emisiones de GEI durante la vida del edificio, lo cual difícilmente se contrarrestaría con las emisiones evitadas por cambios en el uso del suelo, aunque sería un asunto por determinar de manera más precisa. De cualquier manera el desarrollo de viviendas multifamiliares bajo el concepto de compactar las ciudades se encuentra en la línea del desarrollo urbano sostenible, en el que la densificación de las ciudades permita el transporte a pie, en bicicleta o en transporte público (Silbe y Prasetyoadi, 2011) a la vez que se hace un uso más sensato y sostenible de la tierra,

²⁰ Sería posible incluir un quinto nivel sin elevadores, si este nivel fuese subterráneo, pero habría que analizar las condiciones de habitabilidad para este caso.

disminuyendo los cambios en el uso del suelo para urbanización (Chaturbedi y Subban, 2011). En este mismo tenor la vivienda multifamiliar puede ser aprovechada como una estrategia para hacer un uso más eficiente de la energía. Esto se ha planteado en términos de energía, complejidad, poder de explotación del espacio, diversidad de los componentes de la ciudad y tamaño de la ciudad, mediante un análisis del sistema complejo (Rueda, 2002). Las viviendas multifamiliares analizadas se ubican en la periferia de la ciudad en zonas de selva baja caducifolia, lo que origina los importantes cambios de suelo que se calcularon en este documento, además de obligar a sus habitantes a traslados más o menos largos que implican consumos de energía y emisiones de GEI, por lo que el empleo de estos tipos de viviendas sería más útil en zonas de modernización urbana del centro de la ciudad.

- b. El empleo de muros de bloques de concreto asentados con mortero resultó más impactante que el caso de los muros de concreto armado cimbrados con cimbras metálicas, debido a que los primeros requieren de ser revestidos con morteros que a su vez son muy impactantes por sus emisiones de GEI. La estrategia de construcción que evita el empleo de recubrimientos es más eficiente en costos y menos contaminante.
- c. El empleo de madera como cimbra en el estado de Chiapas resulta más impactante por sus emisiones de GEI que la equivalente de acero, debido a que la primera origina cambios en el uso del suelo que repercuten en las emisiones de GEI y tiene menos usos que la segunda opción.
- d. Resulta de alta importancia el efecto de la durabilidad de los materiales y las emisiones de GEI que les corresponden por los reemplazos durante la vida de

los edificios. Esto resulta muy evidente en el caso de pinturas, impermeabilizantes y pisos cerámicos.

Las emisiones de GEI por edificación obtenidas en este documento comparadas con las obtenidas en otras investigaciones, se puede apreciar en la Tabla No. 51.

Tabla No. 51: Emisiones de GEI de edificaciones según diversos autores.

Fuente	Factor de emisiones de GEI (kg CO ₂ e/m ²)	Consideraciones
Bellart y Mesa, 2009	1,660 para vivienda pasiva. 35,500 para viviendas de bajo consumo 113,000 para un edificio antiguo.	Considera además de la etapa de construcción, la de uso de la vivienda. El uso implica las mayores emisiones de GEI por el consumo de energía eléctrica y gas doméstico.
Mercader <i>et al</i> , 2012.	694.16 como promedio de diez edificios de cuatro plantas más sótano	Consideran las emisiones de GEI por los materiales empleados en la construcción.
G. Wadel <i>et al</i> , 2010.	660 para vivienda convencional y 670 para vivienda modular de concreto armado	Considera las etapas de construcción y mantenimiento.
Sabate y Peters, 2011	1,130 para vivienda convencional	Consideran las etapas de construcción y mantenimiento.
Fay <i>et al</i> , 2000.	846 para una vivienda de bajo consumo.	Considera la etapa de construcción.
Keoleian <i>et al</i> (2001)	417 para una vivienda estándar	Considera la etapa de construcción.
Borsani, 2001	500 en edificaciones	Considerando la etapa de construcción.

	comunes.	
Aranda, 2008.	2,040 para una vivienda común sin garaje.	Considera las etapas de construcción, mantenimiento, uso y derribo.
Werner, 1996.	177 para una vivienda de concreto.	

Los resultados obtenidos en otras investigaciones presentan una amplia dispersión, debido a que el método de análisis permite definir los alcances, objetivos y fronteras de cada estudio, pudiendo ser estos diferentes para cada análisis que se efectúe. Como consecuencia de esta característica del método no es posible establecer una comparación directa de los valores obtenidos en esta investigación con los obtenidos en otras. Esta falta de capacidad de comparación entre los ACV efectuados en distintas investigaciones no se contrapone con los objetivos comunes de estos análisis. Según Crawford (2011) estos objetivos se resumen en dos:

- Ayudar a los fabricantes, diseñadores, distribuidores y consumidores a identificar y/o comparar el desempeño ambiental de productos, procesos o servicios con la finalidad de determinar la opción más amigable con el ambiente sobre todo el ciclo de vida del producto o servicio analizado.
- Proveer una base para identificar áreas de mejoramiento ambiental o potenciales de mejora en el desempeño ambiental de un producto particular o de un proceso.

Estos objetivos generales que define Crawford se obtienen en la comparación de los productos o procesos que son evaluados bajo las mismas condiciones de frontera,

objetivos y alcances, con lo que la comparación con los resultados de otros estudios queda fuera del interés del análisis. Por otra parte en los diversos usos que se hacen de los ACV las comparaciones deben hacerse bajo las mismas fronteras, objetivos y alcances. En un estudio efectuado por Cooper y Fava (2006) las principales razones por las que se usan los ACV son:

- Soportar las estrategias de negocios (18%).
- Investigación y desarrollo (18%).
- Como insumo para el proceso de diseño de productos (15%).
- Educación (13%).
- Etiquetado o declaraciones de productos (11%).
- Otros (25%).

En estos usos la comparación de productos o la identificación de oportunidades de mejora siguen siendo los objetivos de estos análisis, por lo que resulta útil únicamente la comparación bajo los mismos supuestos de alcances, fronteras y objetivos, quedando fuera de lugar la comparación entre estudios efectuados bajo otras hipótesis.

La consideración de las emisiones de GEI por las actividades de la mano de obra se emplea muy poco en los ACV. Al no tomar en cuenta estas emisiones se pueden dejar de percibir diferencias en las emisiones de GEI por productos específicos o procesos. Por ejemplo para realizar las excavaciones, estas se pueden hacer a mano o a máquina; si no se consideran las emisiones por mano de obra, las emisiones de GEI aparentarán ser mayores para las excavaciones con máquina por el uso de combustibles fósiles y depreciaciones de equipos, sin embargo al considerar las

emisiones de GEI por la mano de obra el caso de las excavaciones a mano pueden resultar ser más impactantes. Para los casos estudiados, las emisiones por edificación, considerando las emisiones por mano de obra y ordenándolos de menor a mayor los resultados fueron:

Emisiones de GEI por edificación con mano de obra:

San Juan: 325 kg CO₂e/m².

Los Poetas: 422 kg CO₂e/m².

Real del Bosque: 520 kg CO₂e/m².

Emisiones de GEI por edificación sin mano de obra:

San Juan: 240 kg CO₂e/m².

Los Poetas: 306 kg CO₂e/m².

Real del Bosque: 340 kg CO₂e/m².

Los cocientes de estos resultados nos proporcionan una medida de la influencia de la mano de obra:

San Juan: 1.3542

Los Poetas: 1.3791

Real del Bosque: 1.5294

Se aprecia de estos cocientes que la influencia de la mano de obra no es igual para los casos analizados, siendo mucho mayor el efecto de la mano de obra en el edificio Real del Bosque que en los otros dos. Esto implica que es conveniente tomar en cuenta las emisiones de GEI por mano de obra, pues la falta de su consideración

puede llevar a resultados imprecisos, modificando incluso el sentido de las conclusiones.

Por otra parte la evaluación de las emisiones de GEI por las actividades de administración de las obras juega un papel relevante en los casos analizados, poniendo en relieve que la eficiencia en el uso de los recursos conlleva a la par de economía de costos, una disminución en las emisiones de GEI.

7. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1 Conclusiones.

Las emisiones de GEI por metro cuadrado de los edificios analizados son, para el Edificio San Juan de 715 kg CO₂e/m², para el edificio Los Poetas de 742 kg CO₂e/m² y para el edificio Real del Bosque de 843 kg CO₂e/m². El promedio de las emisiones por edificación es de 767 kg CO₂e/m².

Los materiales que más emisiones de GEI provocan al medio son los cementos, que contribuyen con 111.14 kg CO₂e/m² en el caso del edificio San Juan, 115.66 kg CO₂e/m² para el edificio Los Poetas y 126.55 kg CO₂e/m² para el edificio Real del Bosque. El promedio de las emisiones por el uso del cemento es de 118 kg CO₂e/m².

El segundo grupo de materiales que más impactan por sus emisiones de GEI son, para el caso del edificio San Juan y del edificio Los Poetas, los aceros, con 46.26 kg CO₂e/m² y 70.62 kg CO₂e/m² respectivamente, mientras que para el caso del edificio Real del Bosque fueron los productos de madera (cimbras principalmente) que contribuyen con 84.54 kg CO₂e/m².

Como elementos constructivos, los muros de concreto armado (emisiones de GEI entre 87.29 kg CO₂e/m² y 111.39 kg CO₂e/m²) resultaron menos impactantes que los muros de bloques de concreto revestidos con repellos de mortero de cemento-calhidra-arena (emisiones de GEI de 204.38 kg CO₂e/m²).

En el caso de los sistemas de pisos y techos, la comparación entre las losas de concreto armado cimbradas con cimbra de acero (Edificio San Juan y Los Poetas) y el sistema de viguetas de concreto con bovedilla de casetones de poliestireno y firme de concreto armado colado en el sitio (Real del Bosque) nos arrojan valores similares: 43.88 kg CO₂e/m² y 55.32 kg CO₂e/m² para el caso de las losas de

concreto armado contra 46.38 kg CO₂e/m² para el caso del sistema de vigueta y bovedilla. Este resultado no nos permite distinguir de manera contundente una preferencia por un sistema de techo sobre otro.

Las instalaciones eléctricas presentan muy poca variación entre los casos estudiados, al igual que en el caso de las instalaciones hidrosanitarias. Para la cancelería se puede concluir que la opción de ventanas de aluminio de perfil ligero (116.84 kg CO₂e/m² de ventana) tienen emisiones de GEI similares a las ventanas de acero estructural (112.41 kg CO₂e/m² de ventana). Para el caso de las puertas, las emisiones de GEI son prácticamente iguales para los dos casos que se presentaron; las puertas de chapa de acero con armazón de madera de pino y relleno de poliuretano expandido presentaron emisiones de GEI de 110.88 kg CO₂e/m² de puerta, mientras que las puertas de láminas y perfiles de acero estructural presentaron emisiones de GEI de 110.99 kg CO₂e/m² de puerta. Para el caso de la cimentación se aprecia una diferencia importante entre el edificio San Juan y los edificios Los Poetas y Real del Bosque, esta diferencia se deriva de la diferencia en el número de niveles, ya que en el primer caso se tienen tres niveles y en los otros dos solamente dos niveles.

7.2 Limitaciones.

Los valores de emisiones de GEI obtenidos en este estudio para materiales, equipos, mano de obra, conceptos de obra, partidas y edificios, son comparables solamente con resultados que se obtuvieran bajo la misma metodología. Por esta circunstancia su aplicabilidad principal se restringe a las comparaciones que se efectuaron en esta tesis y en todo caso se deberán considerar los alcances, objetivos y fronteras que se definieron para este trabajo.

La Matriz de Insumo-Producto (MIP) empleada corresponde al año 2003, por lo que es probable que la Matriz de Coeficientes Técnicos que se derivan de la primera haya sufrido cambios y por lo tanto los resultados obtenidos no reflejen estos cambios. Por otra parte se asume que existen errores en las estimaciones de las emisiones de GEI calculadas con base en la MIP 2003, ya que implica que los insumos que se requieren para la edificación son fabricados en México con toda su cadena productiva en México. Esto no permite cuantificar las emisiones de GEI por transportes de mercancías que ocurren en el comercio internacional, ni las diferencias entre los procesos de producción de México y otros países. Teóricamente aunque es posible la construcción de una MIP global (Miller y Blair, 2009), no se cuenta con información de este tipo.

No se tomaron en cuenta algunos procesos de fabricación de productos de los que no se dispone de suficiente información para calcular las emisiones de GEI de estos productos, por lo que se tuvo que recurrir a valores aproximados obtenidos de la MIP de México con el error correspondiente al agrupamiento de productos diversos en un solo sector. En otros casos se emplearon valores referenciados en la literatura técnica o en bases de datos que corresponden a otros sitios y por lo tanto pueden tener variaciones por las diferencias en los procesos de fabricación, así como por los alcances de los estudios de los que se derivaron los factores de emisiones empleados.

Los valores calculados de emisiones de GEI no toman en cuenta las emisiones de GEI por el uso de la vivienda (energía eléctrica y gas principalmente) ni por su derribo y disposición de residuos, por lo que se deberán tomar en cuenta estas limitaciones si se desea comparar los valores obtenidos con cualesquiera otros.

La estimación de las emisiones de GEI es tan solo una parte de la evaluación ambiental de un edificio, por lo que los resultados que aquí se obtienen pueden servir como base para afianzar uno de los aspectos de la evaluación ambiental, debiendo considerarse los demás, tales como: la pérdida de biodiversidad, eutroficación, agotamiento de recursos, lluvia ácida, pérdida de suelos, contaminación de aguas superficiales y acuíferos, deterioro de la capa de ozono, acidificación de suelos y aguas, ecotoxicidad y toxicidad humana. La valoración de estos efectos sobre el medio ambiente se resume usualmente en indicadores ambientales, tales como el Ecoindicador 99, CML y el EPS.

La estimación de las emisiones de GEI por cambios en el uso del suelo fue efectuada considerando una cobertura vegetal diferente al existente en el sitio de la construcción, por lo que los resultados pueden presentar diferencias relevantes respecto a la realidad.

7.3 Recomendaciones.

Es recomendable investigar acerca de materiales alternativos al cemento, que sean menos contaminantes que éste, para su empleo en la edificación de viviendas.

Se recomienda evitar el empleo de madera como cimbras o andamios, siendo preferible emplear sistemas de cimbras de acero o en el caso de techos los sistemas prefabricados.

Para los muros es preferible el empleo de aquellos que tengan un acabado aparente, que evite la necesidad de emplear repellos, brindando la confortabilidad e impermeabilidad que se requiere en los muros de exterior.

Los edificios de tres o cuatro niveles son preferibles, por sus emisiones de GEI, respecto a los edificios de uno o dos niveles.

Es conveniente edificar en zonas urbanas existentes, recuperando y modernizando espacios urbanos, para evitar los impactos ambientales derivados de los cambios en el uso del suelo.

Es deseable buscar la optimización en el empleo de recursos, ya que los ahorros se traducirán, por lo general, en disminuciones en las emisiones de GEI, tanto para las actividades directas de la obra (cantidades de obra) como para las actividades de administración de la misma. En el rubro de las emisiones por administración, el empleo de edificaciones y equipos eficientes en el consumo de energía permitirá la disminución de las emisiones de GEI atribuibles a la edificación.

Se deberán preferir materiales y sistemas constructivos que tengan la mayor durabilidad factible en un ejercicio de optimización entre los requerimientos de la edificación y su vida útil.

Es conveniente investigar sobre los siguientes temas:

- Materiales alternativos al cemento para la construcción de viviendas considerando como una de las variables las emisiones de GEI.
- Desarrollo de una Matriz Insumo-Producto para México que considere un mayor desglose de los sectores económicos y permita estimar los impactos ambientales que se derivan de las transacciones internacionales.
- Sistemas constructivos que permitan disminuir los impactos ambientales en edificios de varios niveles.
- Desarrollo tecnológico de recubrimientos y pisos de gran durabilidad y bajo impacto ambiental.

- Estudio del número óptimo de niveles en los edificios con base en consideraciones ambientales.
- Estudio de edificios habitacionales considerando las etapas de edificación y uso con relación a los impactos ambientales, la confortabilidad y los costos.
- Cálculo de las cantidades de carbono contenidas en el suelo y cobertura vegetal para las zonas de vegetación caducifolia y subcaducifolia que se encuentran en la Depresión Central de Chiapas.

8. LITERATURA CITADA.

- Abitante ALR, Bergmann CP, Ribeiro JLD. 2007. Abrasión en Baldosas Cerámicas Esmaltadas: Consideraciones sobre la vida útil y evaluación de su desempeño. *Engenharia Civil*, 29: 71-79.
- Aguirre-Calderón O A, Jiménez-Pérez J. 2011. Evaluación del contenido de carbono en bosques del Sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6 (2): 73-84.
- AHMSA. 2010. Reporte de Inventario de Emisiones 2009. Consultado en http://www.geimexico.org/downs/reportes/Inventario_GEI_2009_AltosHornosdeMexico.pdf
- Albert L. 1998. Curso básico de toxicología ambiental. Editorial Limusa. México D.F.
- Alcorn A, Wood P. 1998. New Zealand Building Materials Embodied Energy Coefficients Database. Volume II – Coefficients. Centre for Building Performance Research.
- Altomonte H, Rogat J. 2004. Políticas de precios de combustibles en América del Sur y México: Implicancias económicas y ambientales. Naciones Unidas. Santiago de Chile.
- Aranda JA. 2008. Modelos energéticos sostenibles para España. Perspectiva desde la ecoeficiencia. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza.
- Arcelor Mittal México. 2011. Reporte de Gases de Efecto Invernadero 2010.

- Argüello T y Cuchí M. 2008. Análisis del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción empleados en las viviendas de bajo coste del programa 10 x10 Con Techo-Chiapas del CYTED. Informes de la Construcción Vol. 60, 509: 25-34.
- Arnal L y Betancourt M. 2007. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Editorial Trillas. México D.F.
- Ayres, R U, Ayres, L ., Råde, I. 2002. The life cycle of copper, its co-products and by-products. International Institute for Environment and Development (IIED) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD).
- Bascetin A, Adiguzel D, Tuylu S, Karadogan A, Caglayan M. 2011. The control of Energy consumption and investigation of CO₂ emissions in the production of aggregate. Gazi University Journal of Science. Journal. Turkey.
- Bathia P, Cummis C, Brown A, Draucker L, Rich D, Lahd H. 2011. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard. Greenhouse Gas Protocol, World Resources Institute, Business Council for Sustainable Development. EUA.
- Bellart CM, Mesa MS. 2009. Impacto ambiental y ciclo de vida de los materiales de construcción. Tesis de Licenciatura, Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Benveniste G, Gazulla C, Fullana P, Celades I, Ros T, Zaera V, Godes B. 2011. Análisis de ciclo de vida y reglas de categoría de producto en la construcción. El caso de las baldosas cerámicas. Informes de la Construcción 63 (522): 71-81.

- Bilec M. 2007. A Hybrid life cycle assessment model for construction process. Tesis Doctoral. Universidad de Pittsburgh.
- Bonilla C. 2011. Metodología y estrategias para la elaboración de estimados de costos para el desarrollo de proyectos en México. Tesis de Maestría. IPN. México, D.F.
- Borsani MS. 2011. Materiales ecológicos: estrategias, alcance y aplicación de los materiales ecológicos como generadores de hábitats urbanos sostenibles. Tesis Master UPC.
- Buitrón H. 2004. Logros del programa de ahorro de energía en el sector eléctrico. Consultado el 3 de febrero de 2012 en <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/3710/2/arthoraciobuitron.pdf>.
- Cardim A. 2001. Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Carrillo V, Pflieger J, Sun T. 2010. Life Cycle Assessment of float glass. Glass For Europe. <http://www.glassforeurope.com>.
- Chaturbedi B, Subban T. 2011. Uso del suelo y planificación urbana. En Graizbord B, Monteiro F, Kipilian SB, y García PA. Megaciudades y cambio climático: ciudades sostenibles en un mundo cambiante. El Colegio de México, Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales.
- Cooper JS, Fava J. 2006. Life cycle assessment practitioner survey: summary of results. *Journal of Industrial Ecology*. 10(4): 12-14.

- Correa E, Arena P, De Rosa C. 2003. Assessing the Environmental Impact of the Production of Concrete Pavers by the use of LCA, in Arid Region Cities of Argentina. PLEA 2003 - The 20th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Santiago – CHILE, 9 - 12 November 2003.
- Craighill A L y Powell J C 1996. Lifecycle assessment and economic evaluation of recycling: a case study. Resources, Conservation and Recycling, 17(2), 75-96.
- Crawford RH. 2011. Life cycle assessment in the built environment. Editorial Spon Press. EUA.
- Cuchí A. 2008. Arquitectura. Proceedings Seminario herramientas informáticas asociadas al ACV. Universitat Autònoma de Barcelona, 18 de junio de 2008.
- De Jong B, Olgún M, Rojas F, Maldonado V, Paz F, Etchevers J, Cruz C, Argumedo J. 2010. Actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2006 en la Categoría de Agricultura, Silvicultura y otros usos de la tierra. Consultado en www.ine.gob.mx/descargas/.../inf_inegei_usos_tierra_2006.pdf.
- De Jong B. 2001. Cambio de uso de suelo y flujos de carbono en Los Altos de Chiapas, México. En Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, del 18 al 21 de octubre de 2001 en Valdivia, Chile (Consulta en CD).
- DeBenedetti B, Maffia L, Rossi S. 2007. From materials to eco-materials: life-cycle environmental approach for Insulation products in building applications.

In Proceedings of the 8th International Conference of Eco-Materials-ICEM8, Brunei University, UK.

- Díaz R, Escárcega S. 2009. Desarrollo Sustentable. Oportunidad para la vida. Editorial Mc Graw Hill. México D.F.
- Díaz Rubio, R. 2011. Repercusión medioambiental del uso de la cerámica estructural en España. Energía embebida y emisiones de CO₂. Tesis de Master. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica. Universidad Politécnica de Madrid.
- Erlandsson M, Borg M. 2003. Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs. *Building and Environment*, 38: 919 – 938.
- Fay R, Graham T, Iyer-Raniga U. 2000. Life-cycle energy analysis of buildings. *Building Research & Information* 28(1): 31-41.
- Flannery T. 2008. El clima está en nuestras manos; Historia del calentamiento global. Editorial Taurus, México D.F.
- Franklin Associates. 2011. Peer-reviewed life cycle inventory for the production and use of installed residential piping systems for three house layouts. Glen Ellyn, Illinois: Plastic Piping Education Foundation. http://www.ppfahome.org/pdf/Peer_Reviewed_Pipe_Use_Phase_Report_combined_Final.pdf,
- Fröhlich C y Lean J. 2004. Solar radiative output and its variability: evidence and mechanisms. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 12(4): 273-320.

- Gómez T, Romanillos P. 2012. El Cambio Climático. Pasado, presente y futuro de un mundo nuevo. Editorial Océano Ámbar. España.
- González C M, Robles F F. 2006. Aspectos fundamentales del concreto reforzado. Editorial Limusa Noriega Editores. México D.F.
- Gore A. 2010. Nuestra elección. Editorial OCEANO Gedisa. Barcelona, España.
- Granados-Sánchez D; López-Ríos GF; Hernández-García MA. 2007. Ecología y silvicultura en bosques templados. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 13(1): 67-83.
- H. Ayuntamiento Municipal Constitucional de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 2008. Plan Municipal de Desarrollo 2008-2010.
- Hammond G, Jones C. 2008. Embodied energy and carbon in construction materials. Proceedings of Institution of Civil Engineers-Energy, 161 (2): 87-98.
- Hanle LJ, Jayaraman KR, Smith JS. 2004. CO₂ emissions profile of the US cement industry. US Environmental Protection Agency, Pennsylvania.
- Haro E. 2010. Determinación mensual del factor de emisiones de CO₂ producido por el parque generador en el sistema nacional interconectado del Ecuador, mediante la aplicación de la metodología de la Convención Marco sobre el Cambio Climático UNFCCC, para el período 2005-2009. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Escuela Politécnica Nacional. Quito. Ecuador.
- Haro R. 2008. Metodologías para la estimación matemática de la Matriz Insumo-Producto simétrica: a partir de las matrices de oferta y utilización

asimétricas en una economía abierta. INEGI y Centro de Estudios Monetarios Latinoamericanos. México D.F.

- Harte J, Holdren Ch, Schneider R, Shirley Ch. 1995. Guía de las sustancias contaminantes, Editorial Grijalbo, México D.F.
- Heairet A, Choudhary S, Miller S, Xu M. 2012. Beyond life cycle analysis: Using an agent-based approach to model the emerging bio-energy industry. 2012 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology. May 16-18, 2012, Boston, MA.
- Hendrickson C, Horvath A. 2000. Resource use and environmental emissions of U.S. construction sectors. *Journal of Construction Engineering and Management* 126 (1): 38-44.
- Hernández FJ. 2009. Energía incorporada y emisiones de CO₂ en la edificación. Metodología para evaluación del nivel de sustentabilidad de materiales de construcción. Caso de estudio: el acero. Tesis doctoral del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la UNAM. México, D.F. Noviembre de 2009.
- Hernández-Castañeda O, Mendoza-Escobedo CJ. 2006. Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico. *Ingeniería. Investigación y Tecnología* VII (1): 57-70.
- Hernández-Sánchez, JM, Roca X, Domènech JM, Garcia-Almiñana D, Casals, M, Vilella Q, Gangoells M, Forcada M, Fuertes A. 2010. Estimación del consumo de energía primaria y de las emisiones de CO₂ de los edificios de

viviendas de una ciudad de tamaño medio. Ponencia en el SB10mad Sustainable Building Conference.

- Holcim Apasco. 2010. Inventario de Gases de Efecto Invernadero 2009. Consultado en www.geimexico.org.
- Horvath A, Chester M, O'Brien C, Network R P. 2009. Greenhouse Gas Assessment of Expanded Polystyrene Food Containers and Alternative Products Used in Los Angeles County–Final Project Report–.
- INAFED. 2005. Enciclopedia de los Municipios de México. Chiapas. Tuxtla Gutiérrez. Gobierno del Estado de Chiapas.
- INEGI. 2006. Cuaderno estadístico municipal de Tuxtla Gutiérrez, Estado de Chiapas.
- Instituto de Tecnologías de la Construcción de Cataluña. 2012. BEDEC. Contingut e criteris. www.itec.cat.
- IPCC. 2006. 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 3. Capítulo 2.
- IPCC. 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- ITEC-BEDEC. 2012. Banco Estructurado De Datos De Elementos Constructivos BEDEC. Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. Disponible en <http://www.itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx>.

- John S, Nebel B, Pérez N, Buchanan A. 2009. Environmental impacts of multi-storey buildings using different construction materials. Department of Civil and Natural Resources Engineering, University of Canterbury.
- Johnson T M, Alatorre C, Zayra R. 2009. México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbonos. Banco Mundial.
- Johnson T W. 2006. Comparison of environmental impacts of steel and concrete as building materials using a life cycle assessment method. Tesis de Master of Science in Civil and Environmental Engineering at the Massachusetts Institute of Technology. EUA.
- Keoleian G, Blanchard S, Reppe P. 2001. Life-cycle energy, costs, and strategies for improving a single-family house. *Journal of Industrial Ecology*, 4 (2):135–157.
- Komatsu Y, Kato Y, Yashiro T. 1994. Survey on the life of buildings in Japan. *Strategies & Technologies for Maintenance & Modernization of Building/CIB W70 Tokyo Symposium 1994. Survey on the Life of Buildings in Japan.*
- Koo C H 2006. A study of the plastic life cycle assessment. Doctoral dissertation, Universiti Teknologi Malaysia, Faculty of Civil Engineering.
- Kumar A, Buddhi D, Chauhan D. 2012. Indexing of Building Materials with Embodied, Operational Energy and Environmental Sustainability with Reference to Green Buildings. *Journal of Pure and Applied Science & Technology*, Vol. 2(1), Jan 2012, pp. 11-22.
- Lacomba R (comp). 1991. *Manual de arquitectura solar*. Editorial Trillas. México D.F.

- Lemay L. 2011. Life Cycle Assessment of Concrete Buildings. Concrete Sustainability Report. National Ready Mixed Concrete Association. CSR04. Octubre de 2011.
- Leontief W. 1970. Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. *Review of Economics and Statistics*, 52: 262–271.
- Leontief W. 1987. Input-Output Analysis. En: Eatwell J, Milgate M y Newman P. (eds), *The New Palgrave. A Dictionary of Economics*, 2: 860-864.
- Lippiatt BC. 2007. Building for Environmental and Economic Sustainability, Technical Manual and User Guide. National Institute of Standards and Technology. USA.
- Lippke B, Wilson J, Perez-García J, Boeyer J, Meil J. 2004. Life-Cycle Environmental Performance of Renewable Building Materials. CORRIM.
- López JM, Sánchez J, Gómez A, Fernández A. 2008. Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte. Monografía. Proyecto EnerTrans. Universidad Politécnica de Madrid.
- López VM. 2009. Cambio Climático y Calentamiento Global, Editorial Trillas. México D.F.
- Macedo I. 2007. Potentials in relation to sustainability criteria. En Sener/ BID/ GTZ (Edit.): *Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México*, México, D.F., México.
- Maldonado N, Rufino JM, Nery F, Maldonado I. 2005. La importancia de la durabilidad en viviendas de interés social en zona sísmica. Reporte del proyecto 25/J025 del Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la

Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica de la Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional. Argentina. Consultado en marzo de 2012 en www.proyectoleonardo.net/index.php/leonardo/article/.../21/26.

- Martchek K. 2006. Modelling More Sustainable Aluminium. The International Journal of Life Cycle Assessment, 11(1), 34-37.
- Martínez E. 2009. Fuentes de Sobre-Costos y Distorsiones en las Empresas Eléctricas Públicas en México. Banco de México. Documentos de Investigación.
- Masanet E, Price L, De la Rue du Can S, Brown R, Worrell E. 2005. Optimization of Product Life Cycles to Reduce Greenhouse Gas Emissions in California. California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research. CEC-500-2005-110-F.
- Mercader MP, Ramírez de Arellano A, Olivares M. 2012. Modelo de cuantificación de las emisiones de CO₂ producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución. Informes de la Construcción, 64 (527): 401-414.
- Miller RE, Blair PD. 2009. Input-Output Analysis. Foundations and Extensions. 2a edición. Cambridge University Press. EUA.
- Mithraratne N, Vale B. 2004. Life cycle analysis model for New Zealand houses. Building and Environment, 39: 483 – 492.

- Nájera JA, Rodríguez I, Méndez J, Graciano J, Rosas F, Hernández FJ. 2006. Evaluación de tres sistemas de asierre en quercus sideroxylla humb & bompl. De El salto, Durango .Ra Ximhai, 2 (2): 497-513.
- Nisbet M, Marceau M, Van Geem M. 2002. Environmental life cycle inventory of Portland cement concrete. Portland Cement Association. Research and development Information. Serial No. 2137^a.
- Norgate TE, Jahanshahi S, Rankin WJ. 2007. Assessing the environmental impact of metal production processes. Journal of Cleaner Production 15: 838-848 Elsevier. Disponible en línea en www.sciencedirect.com.
- Ochoa L, Hendrickson C, Matthews HS. 2002. Economic Input-Output Life-Cycle Assessment of U.S. Residential Buildings. Journal of Infrastructure Systems, 8(4): 132-138.
- Ochsendorf J, Norford LK, Brown D, Durschlag H, Hsu SL, Love A, Santero N, Swei O, Webb A, Wildnauer M. 2011. Methods, Impacts, and Opportunities in the Concrete Building Life Cycle. Reporte de Investigación R11-01. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental del Instituto Tecnológico de Massachusetts.
- Oficina Catalana de Cambio Climático. 2011. Guía práctica para el cálculo de emisiones de GEI. Marzo de 2011- Consultado en http://www20.gencat.cat/docs/canviclimatic/Home/Politiques/Politiques%20catalanes/La%20mitigacio%20del%20canvi%20climatic/Guia%20de%20calcul%20demissions%20de%20CO2/110301_Guia%20pr el 6 de febrero de 2011.

- Okamura T, Furukawa M, Ishitani H. 2007. Future forecast for life-cycle greenhouse gas emissions of LNG and city gas 13A. *Applied Energy*, 84: 1136–1149.
- Pérez A. 2006. Análisis del efecto económico de la aplicación de una medida de salvaguarda. El caso de la industria del triplay. *Economía Mexicana*. Primer Semestre, 1 (15): 67-96.
- Peris ME. 2005. Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. *Building and Environment*, 42: 1329–1334.
- Pimienta D, Domínguez G, Aguirre O, Hernández F, Jiménez J. 2007. Estimación de biomasa y contenido de carbono de pinus cooperi blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques*, 13 (1): 35-46.
- Plasencia SE, Matos C., Posadas A, y Cabrera C. 2007. Estimación horaria de la irradiancia solar total extraterrestre. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 10(19): 72-77.
- PRéConsultants. 2004. Introduction to LCA with SIMAPRO-6. <http://www.pre-sustainability.com/download/manuals/UserManual.pdf>.
- Price L, Phylipsen D, Worrell E. 2001. Energy use and carbon dioxide emissions in the steel sector in key developing countries. Lawrence Berkeley National Laboratory. EUA.
- Puettmann M y Wilson J. 2005. Life-Cycle analysis of Wood products: cradle-to-gate LCI of residential wood buildings materials. *Wood and Fiber Science*, 37 Corrim Special Issue, 2005, pp. 18 – 29.

- Reglamento de Construcciones de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/CHIAPAS/Municipios/Tuxtla%20Gutierrez/TUXReg1.pdf>.
- Robbins A.P., Page I.C. Jaques R.A. 2010. House Fire GHG Emissions Estimation Tool – A Preliminary Framework. Banz Study Report 217. BRANZ, Judgeford.
- Robinson-Gayle S. 2003. Environmental Impact and Performance of transparent building envelope materials and systems. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Brunel.
- Rocha-Tamayo E. 2011. Construcciones sostenibles: materiales, certificaciones y LCA1. Revista Nodo, 6 (11): 99-116.
- Ross S, y Evans D. 2003. The environmental effect of reusing and recycling a plastic-based packaging system. Journal of Cleaner Production, 11(5), 561-571.
- Rueda S. 2002. Modelos de ordenación del territorio más sostenibles. Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.
- Ruiz N. 2011. Estimación de los costos relativos de las emisiones de gases de efecto invernadero en las ramas de la economía mexicana. El Trimestre Económico, vol. LXXVIII (1), 309: 173-191.
- Sabate J, Peters C. 2011. Una visión holística de la reducción del impacto ambiental en edificios del área del Mediterráneo. Informes de la Construcción, 63, EXTRA: 73-87.

- Sand J, Glavind M, Munch-Petersen Ch. 2001. Danish Centre for Green Concrete. Featured in the proceedings of CANMET/ACI International conference, San Francisco, September 2001.
- Sandberg H, Lagneborg R, Lindblad B, Axelsson H, Bentell L. 2001. CO₂ emissions of the Swedish steel industry. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 30(6): 420-425.
- Santoro R, Howarth R, Ingraffea, AR. 2011. Indirect Emissions of Carbon Dioxide from Marcellus Shale Gas Development. *Reporte Técnico del Programa de Agricultura, Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cornell*.
- Schmidt J, Helme N, Lee J, Houdashelt M. 2008. Sector-based approach to the post-2012 climate change policy architecture. *Climate Policy* No. 8: 494–515
- Simonson M, Andersson P, Rosell L, Emanuelsson V, Stripple H. 2001. Fire LCA Model: Cables case study. Swedish National Testing and Research Institute. *Fire Technology*. Report 2001:22.
- Suárez SC. 1997. *Costo y tiempo en edificación*. Ed. Limusa. Noriega Editores. México D.F.
- Suh S. 2004. Functions, commodities and environmental impacts in an ecological-economic model. *Ecological Economics*, 48 (4): 451-467.
- Tan, R. B., y Khoo, H. H. 2005. An LCA study of a primary aluminum supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 13(6), 607-618.

- Tarancón M y Del Río P. 2004. Cambio tecnológico y emisiones de CO₂: Análisis input-output y análisis de sensibilidad mediante programación lineal. *Estudios Económicos de Desarrollo Internacional*, 4 (01): 41-68.
- Tikul N, Srichandr P. 2010. Assessing the environmental impact of ceramic tile production in Thailand. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 118(1382), 887-894.
- Tongpool R, Jirajariyavech A, Yuvaniyama C, Mungcharoen T. 2010. Analysis of steel production in Thailand: Environmental impacts and solutions. *Energy*, 35(10): 4192-4200.
- Torres A y Martínez M. 2001. Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.
- Umaña M. 2011. Sostenibilidad y ciclo de vida de los materiales. Master Arquitectura y Sostenibilidad. Herramientas de Diseño y Técnicas de Control. UPC. Consultado en marzo de 2013 en upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.../UmañaMarisel_Tesina.pdf.
- Vázquez M. 2001. Construcción e impacto sobre el ambiente: El caso de la tierra y otros materiales. *Informes de la construcción*, 52 (471): 29-43.
- Vázquez-Sánchez MA. (Editor). 2005. Programa Estatal De Ordenamiento Territorial. Ecosur.
- Venkatesh G, Hammervold J, Brattebø H. 2009. Combined MFA-LCA for Analysis of Wastewater Pipeline Networks. Case Study of Oslo, Norway. *Journal of Industrial Ecology*. 13 (4), 532-550.

- Vijay S, Molina LT, Molina MJ. 2004. Cálculo de emisiones de contaminación atmosférica por uso de combustibles fósiles en el sector eléctrico mexicano. Preparado para la Comisión de Cooperación Ambiental de América del Norte.
- Wadel G, Avellaneda J, Cuchi A. 2010. La sostenibilidad en la arquitectura industrializada. Cerrando el ciclo de los materiales. *Informes de la Construcción*, 62 (517): 37-51.
- Werner F, Taverna R, Hofer P, Richter K. 2006. Greenhouse gas dynamics of an increased use of wood in buildings in Switzerland. *Climatic Change*, 74(1-3), 319-347.
- Werner T. 1996. Comparison of environmental impacts of steel and concrete as building materials using life cycle assessment method. Tesis de Master en Ingeniería Civil e Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Massachusetts. USA.
- West TO, Marland G, Singh N, Bhaduri BL, Roddy AB. 2009. The human carbon budget: an estimate of the spatial distribution of metabolic carbon consumption and release in the United States. *Biogeochemistry*, 94. (1): 29-41.
- Wilson J, Sakimoto E. 2005. Gate-to-gate life cycle inventory of softwood plywood production. *Wood and Fiber Science*, 37: 58 – 73.
- Żelazna A, y Pawłowski A. 2011. The Environmental Analysis of Insulation Materials in the Context of Sustainable Buildings. In *Environmental Engineering, The 8th International Conference May* (pp. 19-20).