

UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL
AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA
TROPICAL HÚMEDO**

**TESIS
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

ROSA CRISTINA BOLÍVAR FUENTES

DIRECTORES DE TESIS

DR. JOSÉ ROBERTO HERNÁNDEZ BARAJAS

DRA. ERIKA ESCALANTE ESPINOSA

VILLAHERMOSA, TABASCO; AGOSTO DE 2015



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN



AGOSTO 04 DE 2015

C. ROSA CRISTINA BOLIVAR FUENTES
PAS. DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
P R E S E N T E

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales titulado: **"ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO"**, asesorado por el Dr. José Roberto Hernández Barajas sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado está integrado por el MISA. Elizabeth Magaña Villegas y M. en C. Carlos Alberto Torres Balcazar, Dr. José Roberto Hernández Barajas, Dra. Ena Edith Mata Zayas y Dr. Raúl German Bautista Margulis.

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

M. EN C. ROSA MARTHA PADRON LOPEZ
DIRECTORA

UJAT
DIVISION ACADÉMICAS
CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
C.c.p.- Archivo



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**



Villahermosa, Tab., a 04 de Agosto de 2015

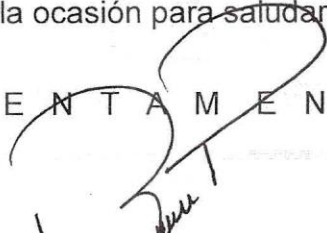
ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
PRESENTE**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza a la **C. ROSA CRISTINA BOLIVAR FUENTES** egresada de la Maestría en **CIENCIAS AMBIENTALES** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **"ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E


**M. EN C. ROSA MARTHA PADRON LOPEZ
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICAS
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado

Miembro CUMEX desde 2008

**Consortio de
Universidades
Mexicanas**
UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400, Fax (993) 354-4308 y 358-1579 E-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx



Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **"ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO"**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 04 de Agosto de 2015.

AUTORIZO



ROSA CRISTINA BOLIVAR FUENTES

Agradecimientos

A Dios

Por la vida que me da y por iluminar mi camino en cada uno de mis pasos, por su fiel compañía en todo el proceso. Gracias por ser mi fuerza, por darme fe y esperanzas en momentos de dificultad. Por permitirme conocer y trabajar con personas estupendas.

A mi familia

Por su comprensión y apoyo constante e incondicional en todo momento. Por estar a mi lado en los buenos y malos momentos. Gracias por su paciencia y su cariño. Principalmente a mi madre, por su amor, ya que sin su ayuda no hubiera sido posible la culminación de este proyecto.

A mis asesores de tesis

Al dr. José Roberto Hernández Barajas, por su dedicación y el tiempo invertido en todas sus enseñanzas, por su paciencia, apoyo, tolerancia y confianza. A la dra. Erika Escalante Espinoza, por motivarme a continuar, por todos sus consejos y paciencia, por la confianza brindada.

A ambos les agradezco ya que fueron parte vital de que se llevará a cabo ese trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca.

A don Chente y sus compañeros por apoyarme en el periodo de toma de datos.

A mi prima Maricela

Por ser más que una simple prima, por ser una amiga, confidente y compañera en locuras, por todo lo aprendido a su lado. Le agradezco a Dios por su vida y la de mis sobrinos.

A mis amigos

Por cada uno de los momentos compartidos, por su cariño, confianza y apoyo. Especialmente a Shirley y Deysi por las porras y la comprensión que me brindaron. A todas y cada una de mis compañeras y amigas de generación de maestría, Liz, Irene, Esme, Blanca, Gaby y Elsa, por todas las experiencias buenas y malas que pasamos. A mi amiga Wendy, gracias por tus enseñanzas, por tu confianza y tu gran apoyo, fue un placer haberte tenido de compañera de estancia. A mi amiga Janet y mi amigo Luis por su sincera y linda amistad en estos últimos meses, he aprendido mucho de ustedes. Gracias a todos por las lecciones de vida que me han dejado.

Dedicatoria

Los resultados de este proyecto, están dedicados a todas aquellas personas que, de alguna forma, son parte de su culminación.

A Dios, por darme la fuerza y coraje para afrontar las verdades de esta vida, por alentarme y bendecirme. Sin Él esto no hubiera sido posible. Gracias por enseñarme que siempre hay algo nuevo que aprender y que los cambios son buenos.

A mi madre Virginia quien fue la mayor motivación para concluir esta meta. Gracias por todo lo que has hecho por esta familia, por tu sobre esfuerzo, tu ejemplo y tu amor a pesar de las situaciones adversas. De todo corazón te dedico este triunfo. Esto es por ti y para ti.

A toda mi familia que siempre ha estado a mi lado. A cada una de mis hermanas, Maritza, Nelly, Virginia, Guadalupe y Julissa y a mi hermano Rogerio. A mis sobrinitos Sara, Esteban Abraham, Devora, David, Habid y Samuel.

A mis amigas más allegadas que son como hermanas para mí.

A mi asesor el dr. Roberto y mi co-asesora la dra. Erika, por la oportunidad de trabajar a su lado.

A todas las personas que han sido parte de este proyecto, a Nuith, Edgar, Wendy y Mercedes.



RESUMEN

Un techo verde es una ecotecnología que consiste en un sistema liviano de techado para edificios urbanos constituido por un sustrato de crecimiento para una capa de vegetación situada en el extremo superior y cuyo propósito es enfriar o aislar a un edificio como resultado de las variaciones térmicas atmosféricas. Para este estudio se realizó un análisis de ciclo vida considerando las etapas de fabricación de materias primas, construcción, operación y mantenimiento, así como la disposición de materiales al término de la vida útil del edificio. Los resultados del análisis son presentados en términos de impactos ambientales potenciales demostrándose que la instalación de un techo verde reduce entre un 2 y 14% dichos impactos negativos así como un ahorro de combustible fósil que van del 3.5 al 13.2%.

ABSTRACT

A green roof is an environmental technology consisting of a lightweight roofing system for urban buildings consisting of a growth substrate for a layer of vegetation located at the upper end and whose purpose is to cool or isolate a building resulting from atmospheric temperature variations. For this study, a life cycle assessment was performed considering the stages of manufacture of raw materials, construction, operation and maintenance, and disposal of materials at the end of the life of the building. The analysis results are presented in terms of potential environmental impacts demonstrating that the installation of a green roof reduced the negative impacts between 2 and 14% as well as fossil fuel savings ranging from 3.5 to 13.2%.



ÍNDICE DE CONTENIDO

Agradecimientos.....	i
Dedicatoria	ii
1. Introducción.....	5
2. Antecedentes.....	9
2.1. El análisis de ciclo de vida.....	9
2.2. Tipos de análisis del ciclo de vida y usos comunes.....	10
2.3. Sustentabilidad energética	10
2.4. El techo verde y componentes típicos.....	11
2.5. Trabajos previos sobre análisis del ciclo de vida de techos verdes.....	13
3. Justificación, Objetivos, Metas e Hipótesis.....	20
3.1. Justificación.....	20
3.2. Objetivo general	21
3.3. Objetivos específicos	21
3.4. Metas.....	22
3.5. Hipótesis.....	22
4. Los Métodos para el Análisis	23
4.1. Etapas Elementales del Análisis de Ciclo de Vida	23
4.1.1. Meta y el alcance del análisis.....	25
4.1.2. Función y unidad funcional.....	30
4.2. Sensibilidad Paramétrica	31
4.3. <i>Software</i> para análisis del ciclo de vida.....	32
4.4. Inventario de la Etapa de Construcción	34
4.5. Inventario de la Etapa de Operación y Mantenimiento.....	36
4.6. El Análisis del inventario.....	38
5. El Análisis del Ciclo de Vida de Edificios Residenciales.....	40
5.1. El consumo de combustible fósil y los potenciales de impacto ambiental	40
5.2. Análisis de sensibilidad paramétrica.....	55
6. Discusión.....	57
7. Conclusiones y Recomendaciones.....	60
7.1. Conclusiones.....	60
7.2. Recomendaciones.....	61
8. Referencias.....	62
Anexo A.....	66
Anexo B.....	78



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Definición de los escenarios de edificación con los sistemas de techado incluidos en el LCA	25
Tabla 2. Lista de materiales de los ocho escenarios de edificación. Cuatro viviendas con techo convencional (CR) y cuatro viviendas con techo verde (GR).....	28
Tabla 3. Materiales con reemplazo y/o mantenimiento dentro del tiempo de vida útil establecido.	28
Tabla 4. Listado de sensores y registradores empleados en la unidad experimental (ver Figura 4).	31
Tabla 5. Escenarios de edificación analizados en función del número de niveles, el consumo anual de energía y los tipos y áreas de techado.....	37
Tabla 6. Comparación de la producción de energía eléctrica en Florida y México en términos de las fuentes de generación.	39
Tabla 7. Resumen del consumo de combustible fósil e impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida de una vivienda de acuerdo al escenario 1L-47CR-5.5 MW (Vivienda de un solo nivel, con techo convencional de 47 m ² y un consumo anual de energía de 5.5 MW.	41
Tabla 8. Resumen del consumo de combustible fósil e impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida de una vivienda de acuerdo al escenario 1L-47GR-5.2 MW (Vivienda de un solo nivel, con techo verde de 47 m ² y un consumo anual de energía de 5.2 MW.....	42
Tabla 9. Consumo de combustible fósil expresado en MJ durante la vida útil de ocho escenarios de edificación seleccionados.	46
Tabla 10. Potencial de acidificación expresada como emisiones de SO ₂ a lo largo de 40 años de ciclo de vida de las viviendas.....	48
Tabla 11. Potencial de calentamiento global expresadas como emisiones de CO ₂ a lo largo de 40 años de ciclo de vida de las viviendas.	50
Tabla 12. Materia particulada expresadas como PM _{2.5 eq} durante el ciclo de vida de las viviendas... ..	52
Tabla 13. Potencial de smog expresado como O _{3 eq} durante el ciclo de vida de las viviendas.....	53
Tabla 14. Impactos ambientales potenciales en términos generales del LCA de los materiales de los veinticuatro escenarios.	56
Tabla A 1. Resumen del consumo de combustible fósil e impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida de una vivienda de un nivel y una superficie de techo de 47 m ² y con diferentes consumos de energía eléctrica.....	67
Tabla A 2. Resumen del consumo de combustible fósil e impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida de una vivienda de un nivel y una superficie de techo de 98 m ² y con diferentes consumos de energía eléctrica.....	69
Tabla A 3. Resumen del consumo de combustible fósil e impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida de una vivienda de dos niveles y una superficie de techo de 47 m ² y con diferentes consumos de energía eléctrica.....	72
Tabla A 4. Resumen del consumo de combustible fósil e impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida de una vivienda de dos niveles y una superficie de techo de 98 m ² y con diferentes consumos de energía eléctrica.....	75



Tabla B 1. Listado de los recursos (materias primas) requeridos para cada componente de construcción de las viviendas de uno y dos niveles con una superficie de techo de 47 m ²	79
Tabla B 2. Listado de los recursos (materias primas) requeridos para cada componente de construcción de las viviendas de uno y dos niveles con una superficie de techo de 98 m ²	81
Tabla B 3. Listado de las fuentes de energía requeridos para cada componente de construcción de las viviendas de uno y dos niveles con una superficie de techo de 47 m ²	83
Tabla B 4. Listado de las fuentes de energía requeridos para cada componente de construcción de las viviendas de uno y dos niveles con una superficie de techo de 98 m ²	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes típicos de un techo verde (Basado en los esquemas de Kosareo y Ries, 007) y Bianchini y Hewage, 2012).....	12
Figura 2. Flujos de entrada y salida de materiales e insumos durante la vida de un techo verde (Basado en el diagrama de flujo de. Memon <i>et al.</i> (2007))......	24
Figura 3. Unidad experimental de un techo verde extensivo usando tres coberturas vegetales de especies nativas tropicales e instalada sobre un edificio de un solo nivel.....	29
Figura 4. Sensores y registradores de las condiciones climatológicas en la unidad experimental de un techo verde extensivo.....	30



1. INTRODUCCIÓN

Un techo ecológico conocido también como azotea o techo verde, techo viviente, techo-jardín o ecotecho, es un sistema liviano de techado para edificios urbanos que contiene un sustrato de crecimiento para una capa de vegetación situada en el extremo superior y que ha sido empleado históricamente como un sistema de aislamiento en regiones templadas, y como un sistema de enfriamiento en regiones cálidas. En ambas condiciones climáticas, el uso de un techo ecológico disminuye significativamente el costo anual en energía eléctrica de un edificio que es necesario tanto para calefacción como acondicionamiento de aire. De acuerdo a la profundidad del medio de crecimiento, los techos ecológicos se clasifican en dos tipos: los techos extensivos, los cuales poseen una profundidad que varía entre 10 y 30 cm y son capaces de sostener únicamente plantas pequeñas; y los techos intensivos, los cuales poseen sustratos de crecimiento más profundos que permiten sostener arbustos e, incluso, árboles. Los componentes básicos que constituyen un techo ecológico son la membrana impermeable, la barrera de raíces, el sistema de drenaje, el sustrato de crecimiento y la capa de vegetación (Sailor, 2008).

La tecnología de techos ecológicos como componente de ambientes urbanos se encuentra apropiadamente desarrollada en los Estados Unidos, Japón y en Europa, particularmente en Alemania y Suecia. En la actualidad, los techos ecológicos no sólo son un instrumento para aislar o enfriar un edificio. Entre las múltiples ventajas que la instalación de un techo ecológico ofrece sobresalen: *i)* mejoramiento del clima urbano al disminuir el conocido efecto de la isla de calor, *ii)* ahorro en gastos por energía eléctrica, *iii)* disminución del efecto invernadero debido a la fijación de carbono por parte de la capa de vegetación así como la reducción de contaminantes atmosféricos, *iv)* captación de agua pluvial que ayuda a disminuir el riesgo de inundaciones y la carencia de agua en la temporada de sequía, *v)* protección a la biodiversidad creando un nicho



ecológico para insectos y aves, vi) control de la temperatura y humedad en el interior y exterior de un edificio, vii) protección de la estructura del edificio ante tormentas y vientos, así como disminución de la erosión y corrosión de los componentes del mismo, viii) reducción del nivel de ruido en los alrededores, e incluso ix) ofrecimiento de un sitio de descanso, recreación y actividad social para los habitantes del edificio (Lundholm y Peck, 2008, Spala *et al.*, 2008, Martens *et al.*, 2008). El inconveniente intrínsecamente asociado a la construcción de techos ecológicos es que el diseño de un edificio debe considerar el peso adicional del mismo, así como un sistema de tuberías necesario para la captación de agua pluvial (Carter y Keeler, 2008).

Asimismo, una de las preocupaciones crecientes sobre la instalación de techos verdes como sustitutos de los techos convencionales es su viabilidad ambiental en términos del ciclo de vida de los materiales empleados en la construcción de los mismos. El ciclo de vida es el conjunto de etapas consecutivas e interrelacionadas de un proyecto o un sistema de producción, desde la adquisición de materias primas o la generación de los recursos naturales hasta la disposición final de materiales. Un análisis de ciclo de vida (LCA, acrónimo en inglés de *Life Cycle Assessment*) es una técnica para evaluar los aspectos e impactos ambientales potenciales asociados a la elaboración de un producto, obra o proyecto. Las tres etapas básicas de un análisis de ciclo de vida son la elaboración de un inventario de las entradas y salidas directas, e incluso indirectas, del sistema de producción, la evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados con las entradas y salidas; y la interpretación de los resultados del análisis de inventario y fases de evaluación de impacto en relación con los objetivos del estudio.

La modalidad de LCA más empleada es el análisis *cradle-to-grave* (traducción directa al español: *de la cuna a la tumba*) y su propósito es estudiar los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo de vida de un proyecto desde la adquisición de materia prima, construcción, instalación, operación y disposición final de los residuos asociados a su destrucción después de cumplir



su tiempo de vida media. Las categorías generales de los impactos ambientales que deben considerarse incluyen el uso de recursos, la salud humana y las consecuencias ecológicas. De acuerdo a la normatividad internacional (ISO 14040-2006), un análisis de ciclo de vida es una herramienta útil para *i)* la identificación de oportunidades para mejorar los aspectos ambientales de los productos en varios puntos de su ciclo de vida, *ii)* la toma de decisiones en la industria, las organizaciones gubernamentales o no gubernamentales (diseño de la planificación estratégica, por ejemplo, el establecimiento de prioridades, producto o proceso o rediseño), *iii)* la selección de los indicadores pertinentes de comportamiento medioambiental, incluyendo las técnicas de medición, y *iv)* la comercialización; por ejemplo, un esquema de vista medioambiental, el etiquetado ecológico o de la declaración ambiental de un producto.

En este estudio se compara la instalación de un techo verde y un techo convencional sobre pequeñas edificaciones urbanas en clima tropical húmedo a partir del análisis del ciclo de vida desde el enfoque de la sustentabilidad energética. Para lograr este propósito se aplicó el método de análisis de ciclo de vida de tipo *cradle-to-grave* para analizar las implicaciones ambientales de la instalación de un techo convencional y de un techo verde de tipo extensivo.

Para la adquisición de la información con la cual se llevó a cabo la investigación, se contó con una unidad experimental de techo verde instalado sobre un edificio de un solo nivel. La unidad experimental está equipada con registradores y sensores de temperatura y humedad del aire, temperatura y humedad del sustrato, precipitación pluvial, y radiación solar directa. Durante este estudio la unidad experimental recopiló datos meteorológicos y de desempeño del techo verde cuando se emplea como cobertura vegetal tres especies nativas tropicales (*Tradescantia spathacea*, *Tradescantia pallida* y *Cyperus ligularis*). La información recopilada en la unidad experimental permitió proponer *fluxes* de calor (que se traducen en diferencias de temperatura) hacia el interior de un edificio como función de la época del año y las condiciones meteorológicas



típicas de la región, mismos que fueron utilizados en los escenarios de simulación de energía en un estudio previo.

Como consecuencia de esta investigación, se aspira a demostrar la capacidad de un techo verde como eco-tecnología para coadyuvar en la sustentabilidad energética regional y con la minimización de los impactos ambientales asociados. Los resultados del análisis son presentados en términos de impactos ambientales potenciales demostrándose que la instalación de un techo verde en edificaciones urbanas es capaz de reducir entre un 2 y hasta un 14.2% los impactos negativos así como produce un ahorro que va de 3.5 a 13.2% en uso de combustibles fósiles. Asimismo, se registraron ahorros anuales de energía eléctrica entre 5.4 y 16%, en función del área de techado y el número de equipos de aire acondicionado empleados en la vivienda.



2. ANTECEDENTES

En este apartado se describen los fundamentos de los techos verdes como ecotecnologías para contribuir al ahorro energético en zonas urbanas así como las definiciones básicas de un análisis de ciclo de vida. Además se presentan las investigaciones más relevantes sobre la aplicación del análisis de ciclos de vida aplicados a techos verdes bajo diversas circunstancias y enfoques.

2.1. El análisis de ciclo de vida

Un ciclo de vida es el conjunto de etapas consecutivas e interrelacionadas de un proyecto, desde la adquisición de materias primas o la generación de los recursos naturales hasta la disposición final de materiales. Un análisis de ciclo de vida (LCA, acrónimo en inglés de *Life Cycle Assessment*) es una técnica para evaluar los aspectos e impactos ambientales potenciales asociados a la construcción, instalación, operación y disposición final de una obra o proyecto (ISO 14040-2006).

Las tres etapas básicas de un análisis de ciclo de vida son la elaboración de un inventario de las entradas y salidas directas, e incluso indirectas, del sistema de producción, la evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados con las entradas y salidas; y la interpretación de los resultados del análisis de inventario y fases de evaluación de impacto en relación con los objetivos del estudio (Guinée *et al.*, 2002).



2.2. Tipos de análisis del ciclo de vida y usos comunes

Existen tres modalidades típicas de análisis de costos del ciclo de vida: i) *Cradle-to-cradle*, es un análisis del ciclo de vida de un producto o proyecto, en el que la etapa final es el reciclaje del mismo en uno nuevo. El producto o componentes de un proyecto reciclados pueden ser idénticos al producto original o distinto, ii) *Cradle-to-grave*, es un análisis completo de un producto desde la materia prima (la cuna) hasta la etapa de desecho (la tumba), y iii) *Cradle-to-gate*, es un análisis parcial del ciclo de vida de un producto que analiza un producto desde la materia prima (la cuna) a la entrada en la fábrica hasta antes de ser distribuido al consumidor.

2.3. Sustentabilidad energética

La sustentabilidad energética es el conjunto de mecanismos, protocolos y tecnologías necesarias para atender la demanda creciente de energía en una sociedad de manera sostenida, cumpliendo con la normatividad vigente y sin comprometer la disponibilidad de energía para generaciones futuras. La sustentabilidad energética puede alcanzarse desarrollando dos tipos de tecnología, la primera se refiere al aprovechamiento de fuentes renovables de energía y la segunda se relaciona a mejorar la eficiencia energética vinculada a las actividades humanas (Prindle *et al.*, 2007). El mejoramiento de la eficiencia energética es el paso inicial para alcanzar la sustentabilidad ya que es una tecnología más barata, más rápida de implementar y más amigable con el ambiente comparada con las nuevas tecnologías basadas en fuentes renovables que requieren de mayor inversión de recursos e infraestructura para la investigación y consolidación de las mismas. Sin embargo, los programas de eficiencia energética suelen carecer de aceptación social, opciones adecuadas de financiamiento, información e incentivos apropiados como es el caso de la reducción o exención de impuestos. Al respecto, la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OECD, del inglés *Organisation for Economic Cooperation and Development*) sugiere como una



medida para el mejoramiento de la eficiencia energética que los nuevos edificios sean hasta un 70% más eficientes que los edificios actuales a través del uso de tecnologías y materiales de aislamiento térmico, sistemas de ventilación e iluminación natural, así como equipos de aire acondicionado y de calefacción con tecnología avanzada que consume menor energía eléctrica (OECD, 2007; OECD, 2010).

2.4. El techo verde y componentes típicos

Los componentes típicos de los techos verdes, consisten en:

Capa de vegetación. La selección apropiada de plantas requiere consideración de las características individuales de las plantas y de factores microclimáticos.

Sustrato de crecimiento. Esta capa contribuye a un rendimiento térmico y la retención de agua, además de que suministra nutrientes y el agua que necesitan las plantas para sus funciones biológicas. Generalmente, el medio de cultivo tiene un alto contenido de minerales porosos y un bajo contenido de materia orgánica para mantener el equilibrio entre el peso y el rendimiento. El espesor de la capa de medio de crecimiento está relacionado con la vegetación que se desee plantar.

Sistema de drenaje. El objetivo principal de esta capa es para retener el agua para el control de la escorrentía y mantener la capa de medio de cultivo húmedo. Además, la retención de aguas pluviales de los techos verdes disminuye y retarda el escurrimiento de agua en el sistema de alcantarillado. La capacidad de retención depende del tipo de techo verde, la vegetación, el conjunto del techado de edificio, las condiciones climáticas y la saturación del suelo. En techos verdes extensivos se requiere de menor capacidad de retención de agua que un techo verde intensivo, ya que el espesor del medio de cultivo y la vegetación es menor.



Barrera de raíces. El propósito principal de esta capa es proporcionar una membrana impermeable para el conjunto de tejado. Otro propósito de esta capa, como su nombre indica, es proteger la estructura de los techos de edificios de las raíces de las plantas que podrían penetrar.

Membrana impermeable. La membrana impermeable previene las pérdidas de materiales así como el paso de la humedad hacia la estructura de concreto y es por lo tanto uno de los elementos más importantes de un techo, sea verde o no.

En la Figura 1 se presentan los componentes del techo verde tal y como son instalados en la práctica.

Capa de vegetación: *Tradescantia*
spathacea, *Tradescantia* *pallida* y
Cyperus ligularis

Sustrato de crecimiento: turba y
agrolita.

Capa de drenaje

Barrera anti-raíces

Impermeabilizante prefabricado SBS

Placa de concreto

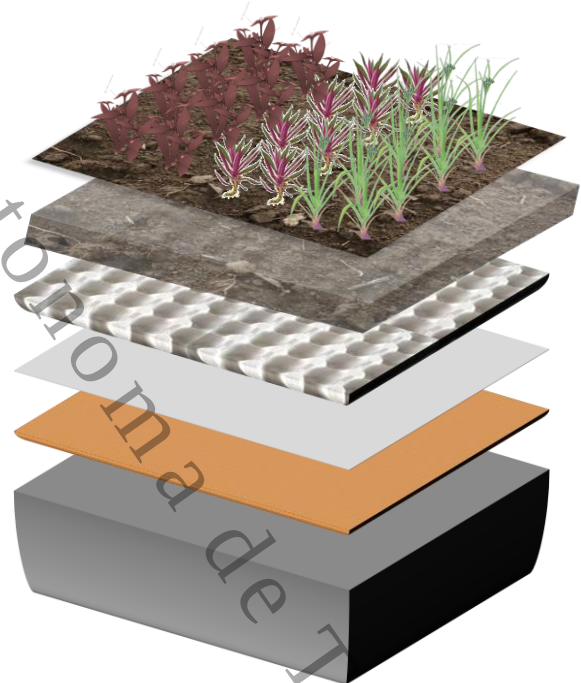


Figura 1. Componentes típicos de un techo verde (Basado en los esquemas de Kosareo y Ries, 2007; y Bianchini y Hewage, 2012).



2.5. Trabajos previos sobre análisis del ciclo de vida de techos verdes

En la literatura especializada se encuentran publicados diversos trabajos sobre análisis de ciclo de vida de techos ecológicos. Wong *et al.* (2003) consideran que, pese a los altos costos iniciales para la instalación de los techos verdes en comparación a un techo convencional, los primeros terminan siendo más económicos considerando el ahorro de energía durante su ciclo de vida. Por su parte, Saiz *et al.* (2006) utilizaron el análisis del ciclo de vida para evaluar los beneficios de la reducción del consumo de energía resultante de la instalación de un techo verde sobre un edificio residencial de 8 pisos en Madrid, España. El uso de energía del edificio fue simulada y conducida suponiendo una vida del edificio de 50 años. Como resultado, se obtuvo que los ahorros anuales en uso de energía de todo el edificio son tan sólo mayores al 1%, pero la energía refrigerante usada durante el verano es reducida por más del 6% y la reducción de energía refrigerante en horas de máxima demanda en los pisos superiores alcanza hasta un 25%. Reemplazando la superficie convencional de los techos por techos verdes el impacto ambiental se reduce entre 1.0 y 5.3%. De igual forma se han realizado estudios comparando los beneficios proporcionados por un techo verde contra techos convencionales, como el publicado por Kosareo y Ries (2007), los autores comparan el ciclo de vida ambiental entre un techo verde extensivo, uno intensivo y un techo convencional, tomando en cuenta los impactos ambientales de la fabricación, transporte, instalación operación, mantenimiento y eliminación en los tres sistemas de techos, se analizaron y documentaron sus similitudes y sus diferencias obteniendo que, para un techo verde aunque la reducción de energía no es muy significativa en relación a la energía utilizada en su construcción, sí es significativo para el impacto ambiental durante el ciclo de vida del edificio. Memon *et al.* (2007) evaluaron el impacto ambiental del ciclo de vida (LCIA) de cuatro tecnologías para el tratamiento de aguas grises generadas en hogares y describen el desarrollo de una nueva herramienta LCIA. Las tecnologías investigadas incluyen carrizales, biorreactores de membrana, reactores de membrana químicos y un innovador sistema de



reciclaje de agua por un techo verde. Los materiales y la energía necesaria para las etapas de construcción y operación de estas tecnologías han sido cuantificados por 20 escalas de desarrollo. Toda la información recopilada se utilizó para preparar los inventarios de ciclo de vida para cada tecnología. Los inventarios se han utilizado como materia prima para realizar el análisis empleando el *software* Simapro®. Los resultados del estudio indican que las tecnologías basadas en procesos de tratamiento naturales tienen bajo impacto ambiental.

Oberndorfer *et al.* (2007) mencionan que uno de los objetivos fundamentales de la ecología industrial es avanzar hacia sistemas integrados que eliminan los productos de desecho y optimizar así la captación de energía durante todo el ciclo de vida de los materiales y que los techos verdes pueden ayudar a alcanzar este objetivo proporcionando un sumidero para aguas grises, entre otros beneficios integrados. Sin embargo, la investigación hasta el momento se ha enfocado en las ventajas de cada tecnología de construcción verde en lugar de los efectos sinérgicos de integración.

Sailor (2008) presenta un modelo matemático para la simulación de energía en edificios con techos verdes. El modelo ofrece a los arquitectos e ingenieros civiles de un método de exploración de las implicaciones energéticas en el diseño de edificios contando con techos verdes. Como resultado de ello, da lugar a estimaciones cuantitativas de los ahorros potenciales de energía de los techos verdes, que puede ser integrado en un análisis de costo del ciclo de vida. En Carter y Fowler (2008) se estudia la posibilidad de establecer techos verdes como parte de la obra civil a través de instrumentos de política ambiental. Ellos mencionan que cuando los costos del ciclo de vida entero del techo se calculan, los beneficios privados y públicos, tales como la retención de las aguas pluviales, construcción de ahorro de energía y calidad del aire, compensan gran parte de los costos adicionales iniciales de construcción del techo.



Getter *et al.* (2009) estudiaron el potencial de absorción de carbón en techos verdes extensivos, en donde encontraron que el amplio sistema de techo verde absorbe 375 g carbón/m². Muchos componentes de un techo verde tienen un "costo" de carbono en términos del proceso de fabricación. La energía incorporada describe la energía total consumida que se puede expresar como la cantidad de carbono liberado por un producto durante su ciclo de vida. Los componentes típicos de un techo verde que fueron considerados en este estudio fueron: una barrera de raíz instalado en la parte superior de la membrana de techo normal (que protege el techo de daño de la penetración de las raíces), una capa de drenaje por encima de la barrera de raíces (que permite que el exceso de agua fluya fuera del techo), y un sustrato de crecimiento. Muchos estudios de análisis de ciclo vida ignoran estos componentes únicos de un techo verde haciendo la suposición de que la barrera de la raíz, capa de drenaje, el sustrato y el material vegetal todos tendrán un costo de carbono similar al de los tejados tradicionales de grava pero esta suposición puede no ser válida en todos los escenarios. Por su parte, Myrans (2009) comparó tres tecnologías verdes en términos de energía y el ahorro neto de carbono en azoteas de Toronto. Los valores de energía se calcularon a través de análisis del ciclo de vida y en comparación con las energías estimadas producidas y/o almacenados por cada tecnología. Por último, la autora menciona que la agricultura urbana es una herramienta educativa que une a los ciudadanos con su entorno y proporciona beneficios sociales y de salud al sector más vulnerable de la sociedad; por lo tanto, un análisis del ciclo de vida completo puede ser una herramienta útil al analizar los datos desde una perspectiva energética y de carbono.

En otro estudio, Jim y Hongming (2010) muestran la dinámica de flujo de calor en un techo verde en un ecosistema tropical para proporcionar una base científica para el diseño y la gestión de esta tecnología. Ellos establecieron parcelas verdes experimentales en un techo para controlar la radiación solar total, la radiación neta, y los parámetros micrometeorológicos. Los resultados demostraron las características del ciclo de vida de los componentes que



participan en el flujo de calor. Se encontró que fluctuaciones temporales de flujo de calor se correlacionan fuertemente con variables meteorológicas.

Jim y Tsang (2011) estudiaron las propiedades biofísicas y el rendimiento térmico de un techo verde intensivo, encontrando que además de enfriar el ambiente, los techos con vegetación pueden reducir la absorción de la radiación solar, la retención, y la transmisión a través de la losa de techo. Por lo tanto reducen la carga térmica de las habitaciones en el verano, y la pérdida de calor a través del techo interior durante el invierno. La temperatura local ambiental también se puede reducir por la sombra de las plantas. Las funciones biológicas de vegetación tales como la fotosíntesis, la respiración y la transpiración, pueden absorber una proporción importante de la energía solar y contribuir a la refrigeración por evaporación. El rendimiento térmico de techos verdes puede reducir la temperatura local del aire cerca de la cubierta y suprimir el flujo de calor en el edificio. La amplia gama de beneficios ambientales y energéticos de los techos verdes se han estudiado recientemente. Además del rendimiento térmico, puede incluirse la capacidad de aumentar la retención de aguas pluviales y la calidad de aguas pluviales, extendiendo la vida útil de la membrana impermeabilizante, la mejora de la calidad del aire y la mejora de la diversidad de vida silvestre urbana. Por su parte Zinzi y Agnoli (2011) hicieron una comparación entre la energía y el confort de refrigeración pasiva y técnicas de mitigación de las islas urbanas de calor de los edificios residenciales en la región mediterránea. Los autores mencionan que la variabilidad de los techos verdes en función de muchas variables deja claro que una comparación definitiva entre las técnicas seleccionadas requiere de un análisis en profundidad teniendo en cuenta, además de la cuestión de la energía, otros aspectos importantes tales como la gestión del agua y la demanda, análisis de ciclo de vida y costos, impactos ambientales sobre el confort urbano y en la mitigación de isla de calor urbano. En otro estudio, Jim y Tsang (2011) mencionan que los beneficios del techo verde incluyen enfriar la temperatura ambiente, la superficie e interior y aliviar el efecto de isla de calor urbano, la reducción de la escorrentía del agua



de lluvia y el riesgo de inundaciones y mejorar la calidad de las aguas pluviales, la creación de espacios verdes recreativos especialmente en compactas zonas urbanas, lo que aumenta la vida útil de los materiales del techo, y que constituyen el hábitat y trampolines para la vida silvestre y la mejora de la biodiversidad urbana. Además, la evaluación del ciclo de vida y análisis de valoración indican un beneficio económico positivo de los techos con vegetación. Whatley (2011) realizó un análisis de ciclo de vida del costo-beneficio de sistemas de techos verdes, se determinó el impacto económico y ambiental de instalación de techos verdes en todas las escuelas públicas de Atlanta. Este estudio proporciona evidencia de que los beneficios acumulados a lo largo de un ciclo de vida de 40 años asociado con las instalaciones a gran escala de techos verdes, como en todas las escuelas públicas de Atlanta, es mayor que el costo inicial incurrido. De los factores incluidos en el análisis de los beneficios se registraron reducciones en los costos de energía/servicios públicos, emisiones reducidas y las mejores prácticas de manejo. Por otro lado Susca *et al.* (2011) evaluaron el CO_2^{eq} por cada kilogramo de material de construcción que no fue emitido mediante el uso de la metodología de evaluación del ciclo de vida, tanto en la construcción como en la etapa de sustitución, con el fin de hacer que los efectos de la duración de la vida de los materiales de construcción comparables con los derivados de la evaluación del albedo de la superficie. En una evaluación del ciclo de vida típico en el que el efecto de albedo de la superficie no se considera, el techo verde sería considerado la opción más preferible en comparación al techo blanco.

Por su parte, Hong *et al.* (2012) realizaron un análisis de ciclo de vida para evaluar los efectos económicos y ambientales, por la mejoría funcional en las instalaciones de escuelas primarias mediante la aplicación de diversos escenarios basados en sistemas de techos verdes con la combinación de medidas de ahorro de energía. Utilizando el resultado de modelado de la energía los autores estimaron el nivel de reducción de las emisiones de CO_2 por el ahorro de energía y la absorción de CO_2 por las plantas del sistema de techado y se realizó un análisis de costos en el ciclo de vida del CO_2 . Los



resultados de este estudio pueden ser utilizados para introducir las medidas de ahorro más adecuadas para la instalación específica de un sistema de techado verde así como también para decidir qué ubicación es adecuada para poner en práctica un sistema de techado considerando las características de clima de la región.

Recientemente, Bianchini y Hewage (2012) estudiaron los beneficios ambientales de los techos verdes mediante la comparación de las emisiones de NO_2 , SO_2 , O_3 y PM_{10} en el proceso de fabricación de los componentes del techo verde con la capacidad del mismo para la remoción de contaminantes atmosféricos. Dicho análisis demostró que los techos verdes son productos sostenibles en el largo plazo y, en general, la contaminación del aire debido al proceso de producción de polímeros puede ser compensada por los techos verdes entre $2/3$ y $1/3$ de los años de la vida útil del mismo. Sin embargo, el proceso de fabricación de polietileno de baja densidad y polipropileno tiene muchos otros impactos negativos para el medio ambiente y que deben ser considerados en estudios a largo plazo.

Por su parte, Peri *et al.* (2012) analizaron el efecto de considerar la disposición final de los materiales de desecho al término de la vida útil de un techo ecológico. Los autores proponen un procedimiento generalizado para la inclusión de los costos asociados a la disposición final en un análisis del ciclo de vida de un techo ecológico, resolviendo así una de las mayores debilidades de los análisis de ciclo de vida publicados a la fecha. Finalmente, ellos aplican el procedimiento propuesto a un caso específico obteniendo que, bajo las condiciones del estudio, el techo verde genera menores impactos ambientales que un techo convencional.

Zhang *et al.* (2012) mencionan que se cree que un techo verde se puede conservar durante 40-50 años pero un techo convencional sólo se puede conservar durante 25 años. De acuerdo a los autores, existen varias barreras encontradas en la promoción de sistemas amplios de techos verdes para los



edificios existentes en Hong Kong. Este estudio identificó los obstáculos comúnmente mencionados. Los tres obstáculos más importantes encontrados en la práctica se destacan como "La falta de promoción de las comunidades gubernamentales y sociales entre los sectores público y privado", "falta de incentivos por parte del gobierno hacia los propietarios de los edificios existentes" y "aumento en el costo de mantenimiento".

Por último, Susca (2012), realizó una comparación de un techo blanco y uno negro referente a la mejora de la evaluación del ciclo de vida incluyendo el efecto de albedo de la superficie sobre el cambio climático. Los resultados teóricos obtenidos por el modelo dependiente del tiempo se aplicaron al estudio de caso de un techo negro y un techo blanco evaluados en los plazos de 50 y 100 años que se centraban en el impacto potencial de calentamiento global. El ciclo de vida comparativo de evaluación del impacto de los dos techos muestra que el albedo superficial juega un papel crucial en la compensación de los forzamientos radiativo. En el horizonte temporal de 50 años, el albedo superficial es responsable de una disminución de $\text{CO}_2 \text{ eq}$ de 110 a 184 kg y 131 a 217 kg en 100 años. Además, el techo blanco en comparación con el techo negro, debido al alto albedo, disminuye el consumo de energía anual de aproximadamente 3.6 a 4.5 kWh/m².



3. JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS, METAS E HIPÓTESIS

La justificación nos permite entender la importancia de evaluar el desempeño ambiental y energético de un techo verde en clima tropical húmedo. Por su parte, los objetivos y metas de esta investigación han permitido conocer el impacto de la instalación, operación y disposición final de techos verdes bajo condiciones de clima tropical húmedo considerando diversos componentes de construcción, tanto de importación como aquellos disponibles en la región. Las ventajas de la operación de un techo verde, tales como el enfriamiento de las edificaciones y la capacidad de captación pluvial, son impactos positivos lo cual determina el beneficio de éste como ecotecnología. Finalmente, la hipótesis establecida en este estudio aspira a demostrar que un techo verde a lo largo de su ciclo de vida genera menos impactos negativos al ambiente así como ayuda al ahorro energético.

3.1. Justificación

Este estudio contribuye al desarrollo de análisis de ciclo de vida en techos verdes extensivos instalados en clima tropical húmedo dado que existen pocos análisis bajo dichas condiciones. La instalación de un techo verde bajo condiciones imperantes en Tabasco podría impactar favorablemente al ahorro energético de pequeñas edificaciones por lo que es necesario conocer cuál es el efecto de los parámetros de diseño más importantes de un techo extensivo. Para poder estimar el ahorro energético como resultado de la instalación de un techo verde extensivo, se generó una base de datos experimentales sobre las principales variables meteorológicas y de operación del techo durante un



año. Cabe mencionar que existe poca información sobre la operación real de un techo verde en condiciones del trópico húmedo tabasqueño. Como resultado, un análisis de ciclo de vida permite evaluar los aspectos ambientales e impactos potenciales a lo largo de la vida del techo verde extensivo desde la adquisición de la materia prima hasta la instalación, operación y terminación de la vida útil del mismo contemplando la reutilización y disposición final de los residuos producidos. Para complementar el estudio, se ha requerido realizar un análisis del ciclo de vida y la estimación del gasto en energía eléctrica de un techo convencional bajo las mismas condiciones con el propósito de comparar los impactos asociados a su instalación con los impactos relacionados a la instalación de un techo verde extensivo.

3.2. Objetivo general

Comparar las relaciones entre la instalación de un techo verde y un techo convencional sobre pequeñas edificaciones urbanas en clima tropical húmedo a partir del análisis del ciclo de vida y desde el enfoque de la sustentabilidad energética.

3.3. Objetivos específicos

- Aplicar el método de análisis de ciclo de vida de tipo *cradle-to-grave* para analizar las implicaciones ambientales de la instalación de un techo verde de tipo extensivo en comparación a la instalación de un techo convencional.
- Estudiar el efecto de los parámetros de diseño más importantes en un techo verde con base en simulaciones de energía.



3.4. Metas

- Demostrar la capacidad de un techo verde como eco-tecnología para coadyuvar en la sustentabilidad energética regional con la minimización de los impactos ambientales asociados.
- Generar y aplicar conocimiento en una línea de investigación poco desarrollada en México.

3.5. Hipótesis

En condiciones de clima tropical húmedo, un techo verde extensivo en pequeñas edificaciones urbanas, a lo largo de su ciclo de vida genera menos impactos negativos al ambiente y proporciona mejores y mayores beneficios que un techo convencional, además que contribuye a la sustentabilidad energética del Estado.



4. LOS MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS

En este capítulo se abordan los procedimientos, guías y herramientas disponibles y necesarias para el análisis del ciclo de vida de un proyecto de construcción de edificaciones urbanas considerando además la instalación de un techo verde como tecnología pasiva de ahorro energético. Estos procedimientos cuantifican los impactos potenciales de un proyecto de edificación realizando un inventario de los materiales utilizados, no sólo durante la etapa de construcción, sino también durante las etapas previas de manufactura de los materiales, la operación del edificio y la demolición y desmantelamiento de la obra.

4.1. Etapas Elementales del Análisis de Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida realizado se basó en los lineamientos establecidos por Guineé *et al.* (2002) y que a su vez se basan en las tres etapas elementales de un análisis de ciclo de vida. El diagrama de flujo mostrado en la Figura 2 resume las entradas y salidas de los materiales, en el transcurso de la vida útil de éstos.

ATHENA® Impact Estimator for Buildings es la única herramienta gratuita que está diseñada para evaluar edificios enteros y conjuntos basados en la evaluación del ciclo de vida en la modalidad de la *cuna a la tumba* (*cradle to grave*).

El LCA en la modalidad de la *cuna a la tumba* contempla los impactos relacionados con los siguientes procesos:

- Fabricación de materiales, incluyendo la extracción de recursos y materiales reciclados.



- Transporte.
- Construcción.
- La variación regional en el uso de energía, el transporte y otros factores.
- Tipo de inmueble y la vida útil supuesta.
- Efectos de mantenimiento y remplazo.
- Demolición y eliminación.

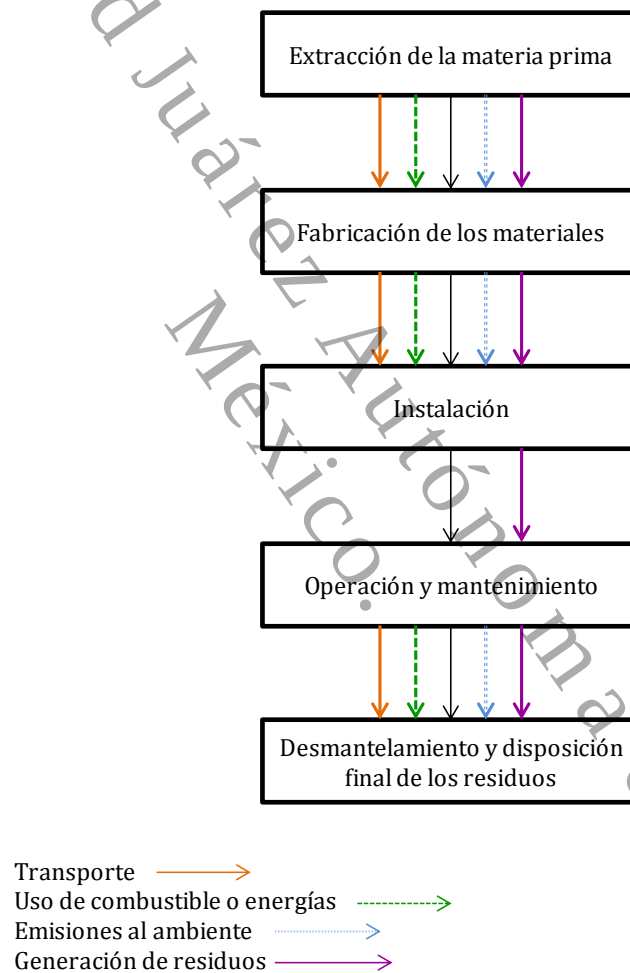


Figura 2. Flujos de entrada y salida de materiales e insumos durante la vida de un techo verde (Basado en el diagrama de flujo de. Memon *et al.* (2007)).



El Estimador de Impactos no incluye una herramienta para simular la energía operacional del edificio, sin embargo, sí permite introducir los resultados de una simulación de energía con el fin de calcular las cargas del ciclo del combustible, incluidos los efectos de pre-combustión, y los factores en los resultados generales.

Las categorías de impacto contempladas en este *software* son:

- Potencial de calentamiento global
- Potencial de acidificación
- Potencial de efectos respiratorios en la salud humana.
- Potencial de agotamiento del ozono
- Potencial de smog fotoquímico
- Potencial de eutrofización
- Consumo de combustible fósil

4.1.1. Meta y el alcance del análisis

La meta del LCA fue el estudio de las ventajas ambientales e impactos negativos potenciales. Este análisis incluyó las etapas de la adquisición de las materias primas, construcción, instalación, operación, mantenimiento y disposición final de techos verdes extensivos de las mismas características pero de diferente extensión e instalados sobre edificios de uno o dos niveles, y en comparación a las implicaciones ambientales asociadas a la construcción de un techo gris convencional. Los edificios con los sistemas de techado analizados se definen en la Tabla 1.

Tabla 1. Definición de los escenarios de edificación con los sistemas de techado incluidos en el LCA

Elemento y notación	Edificios							
	1L-47GR	2L-47GR	1L-98GR	2L-98GR	1L-47CR	2L-47CR	1L-98CR	2L-98CR
Tipo de techo	Verde	Verde	Verde	Extensivo	Convencional	Convencional	Convencional	Convencional
Área superficial (m ²)	47	47	98	98	47	47	98	98
Niveles de edificación	1	2	1	2	1	2	1	2



Los espacios arquitectónicos en cada una de las edificaciones se distribuyeron de la siguiente manera:

- Edificación con una **extensión de techo de 47 m² y un solo nivel**; un dormitorio principal y un secundario con dimensiones de 11.7 y 8.4 m², respectivamente; un baño de 2.4 m², la cocina de 6 m², un pasillo de 1.1 m², una sala-comedor de 10.9 m², un área de lavado de 6 m², una cochera y un porche no techados de 12 m² y 1.5 m² respectivamente.
- Edificación con una **extensión de techo de 47 m² y dos niveles**; en el primer nivel: Dormitorio de 12 m², cocina de 9 m², baño de 2.5 m², sala-comedor de 15.8 m², pasillo de 1.2 m², porche y cochera no techadas de 1.5 m² y 12 m² respectivamente, área de escaleras de concreto de 6 m²; por su parte, el segundo nivel está constituido por un área de lavado de 6 m², dos dormitorios de 12 m² y 9 m², respectivamente; baño de 3 m², área de pasillos de 10.5 m² y área de escaleras de 6 m².
- Edificación con una **extensión de techo de 98 m² y un solo nivel**; está constituido por un dormitorio principal 17.5 m², dos dormitorios adicionales de 12 m² cada uno, baño de 6 m², cocina de 12 m², área de lavado de 9 m², sala-comedor de 24.5 m², área de pasillo de 5 m², porche de 7 m² y cochera de 15 m² (estos dos últimos espacios sin techar).
- Edificación con una **extensión de techo de 98 m² y dos niveles**; en el primer nivel: sala-comedor y área de pasillo de 46.5 m², baño de 9 m², área de lavado de 12 m², cocina de 18 m², área de escaleras de 12 m², porche de 4.5 m² y cochera de 18 m² (los últimos dos espacios sin techar); en el segundo nivel existe un dormitorio principal de 24 m² con un baño de 6 m², dos dormitorios de 20 m² cada uno, un baño de 6 m², área de escaleras de 12 m² y área de pasillos de 9.5 m².



Para el análisis que se llevó a cabo se consideró un tiempo de vida útil de 40 años de las edificaciones, tanto para las que contemplan un techo verde como para las que cuentan con un techo convencional. Durante dicho tiempo se contempla el reemplazo de algunos materiales. En particular, el techo gris (convencional) deberá ser desmantelado e instalado dos veces más que el techo verde de acuerdo a Kosareo *et al.* (2007), lo anterior se debe a que en caso del techo gris este se encuentra expuesto a intemperismos tales como tormentas, acción del viento y radiación solar, los cuales disminuyen el tiempo de vida de las membranas que componen al techo gris. Al contrario en un techo verde lo que se mantiene expuesto a la intemperie son el sustrato y la cobertura vegetal. En la Tabla 2 se presenta el listado de los materiales y las cantidades requeridas para cada casa. En la Tabla 3 se presentan los materiales que requieren reemplazo y el tiempo en que éste se realiza. Los criterios de construcción de las edificaciones fueron basados en el *Código de Edificación de Vivienda*, por parte del gobierno mexicano (CONAVI, 2010).

La información experimental del desempeño del techo verde fue obtenida a partir de una unidad experimental de techo verde extensivo con una forma rectangular con dimensiones de 2.1 m de longitud y un ancho de 1.6 m, el espesor del sustrato es de 26 cm, en donde este último es una mezcla de turba (marca *Premier*®) y agrolita (*Decalite*®) en relación 1:1 para los primeros 20 cm de sustrato, para los 6 cm de la superficie se empleó turba. Dicha unidad está dividida en tres secciones de tamaños iguales, en donde fueron colocadas cada una de las tres coberturas vegetales nativas tropicales: *Tradescantia spathacea*, *Tradescantia pallida* y *Cyperus ligularis* (Figura 3). La unidad experimental operó durante un año (marzo 2013-febrero de 2014) y en cada sección se colocaron 27 individuos de cada especie (Canul Gómez, 2014).



Tabla 2. Lista de materiales de los ocho escenarios de edificación. Cuatro viviendas con techo convencional (CR) y cuatro viviendas con techo verde (GR).

Materiales generales	Unidad física	Valor		Valor		Masa equivalente (Ton)		Masa equivalente (Ton)	
		1L-47	2L-47	1L-98	2L-98	1L-47	2L-47	1L-98	2L-98
Ventana con marco de aluminio	kg	41.7	73.8	70.3	125.1	0.0417	0.0738	0.0703	0.1251
Concreto a 30 MPa (cenizas volátiles 25%) ^a	m ³	N/A	1.1	N/A	3.5	-	2.5	-	8.2
Concreto a 30 MPa (cenizas volátiles 9%)	m ³	48.5	60.6	95.2	118.4	112.8	140.8	221.3	275.4
Blocks de concreto	Blocks	1665.0	3102.0	2518.2	4501.3	31.6	58.9	47.8	85.5
Mosaico para pisos	m ²	54.8	116	116.2	233.9	4.3	9.1	9.1	18.2
Cristal para ventana de hoja doble	m ²	9.4	16.5	16.226	28.1	0.1522	0.2671	0.2627	0.4545
Emulsionado de asfalto (Imprimador)	kg	0.0805	0.0805	0.1681	0.1681	0.0805	0.0805	0.1681	0.1681
Poliestireno expandido (espesor 25 mm)	m ²	15.7	15.7	15.7	15.7	0.0113	0.0113	0.0113	0.0113
Lámina galvanizada	Toneladas	0.3103	0.3103	0.3103	0.3103	0.3103	0.3103	0.3103	0.3103
Panel de cristal	Toneladas	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
Membrana de betún modificado	kg	753.8	753.8	1577.7	1577.7	0.7538	0.7538	1.6	1.6
Mortero	m ³	5.4	10.1	8.2	14.6	6.9	12.9	10.5	18.6
Esmalte	Toneladas	0.0235	0.0287	0.0261	0.0313	0.0235	0.0287	0.0261	0.0313
Varillas	Toneladas	4.6	7.4	8.3	12.7	4.6	7.4	8.291	12.7028
Asfalto para techado	kg	733	733	1534	1534	0.733	0.733	1.534	1.534
Madera para cimbra	m ³	0.0819	0.1146	0.0982	0.131	0.0365	0.051	0.0437	0.0583
Solvente de base alquídica	L	1.4	1.4	1.4	1.4	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011
Pintura de látex base agua	L	4.7	6.5	5.6	7.5	0.0035	0.0049	0.0042	0.0056
Materiales extra para el techo verde (GR)									
Polietileno de alta densidad ^b	m ²	407.1	407.1	712.2	712.2	0.0611	0.0611	0.1068	0.1068
Agregado de piedra fina triturada	Toneladas	1.5	1.5	2.4	2.4	1.5	1.5	2.4	2.4
Polipropileno	Toneladas	0.0095	0.0095	0.0175	0.0175	0.0095	0.0095	0.0175	0.0175

^a Materiales para escaleras

^b Para capas de drenaje y anti-raíces

Tabla 3. Materiales con reemplazo y/o mantenimiento dentro del tiempo de vida útil establecido.

Material	Años transcurridos para el primer reemplazo
Asfalto para techado	22
Membrana estándar de betún modificado de 2 capas	23
Paredes	26

Asimismo, esta unidad fue equipada con registradores y sensores de temperatura y humedad del aire, temperatura y humedad del sustrato, precipitación pluvial, y radiación solar directa (Figura 4). Las características de los sensores y registradores se describen en la Tabla 4. La diferencia de



temperatura entre la parte superior del sustrato y la parte inferior de la unidad (esto es, el fondo del sustrato) ha permitido calcular la disminución de temperatura que el techo verde (cobertura vegetal más sustrato) fue capaz de producir bajo condiciones del trópico húmedo. La información recopilada en la unidad experimental permitió proponer *fluxes* de calor (y que se traducen en diferencias de temperatura) hacia el interior de un edificio como función de la época del año y las condiciones meteorológicas típicas de la región, mismos que fueron utilizados en los escenarios de simulación de energía en un estudio previo (Fuentes Velasco, 2014).



Figura 3. Unidad experimental de un techo verde extensivo usando tres coberturas vegetales de especies nativas tropicales e instalada sobre un edificio de un solo nivel.



4.1.2. Función y unidad funcional

La unidad funcional definida en este estudio es la demanda energética expresada en MWh/año de edificios urbanos de uso residencial, de uno y dos niveles, que tienen instalados techos verdes extensivos con una extensión de 47 y 98 m², operando bajo condiciones de clima tropical húmedo durante los 365 días del año por un periodo de vida útil de 40 años y en comparación con la demanda energética de los mismos edificios descritos pero con techos convencionales operando bajo las mismas condiciones y con una vida útil de 40 años. Así mismo, la demanda energética puede expresarse con unidades de MWh/m² en el caso de comparar el efecto de la superficie techada.

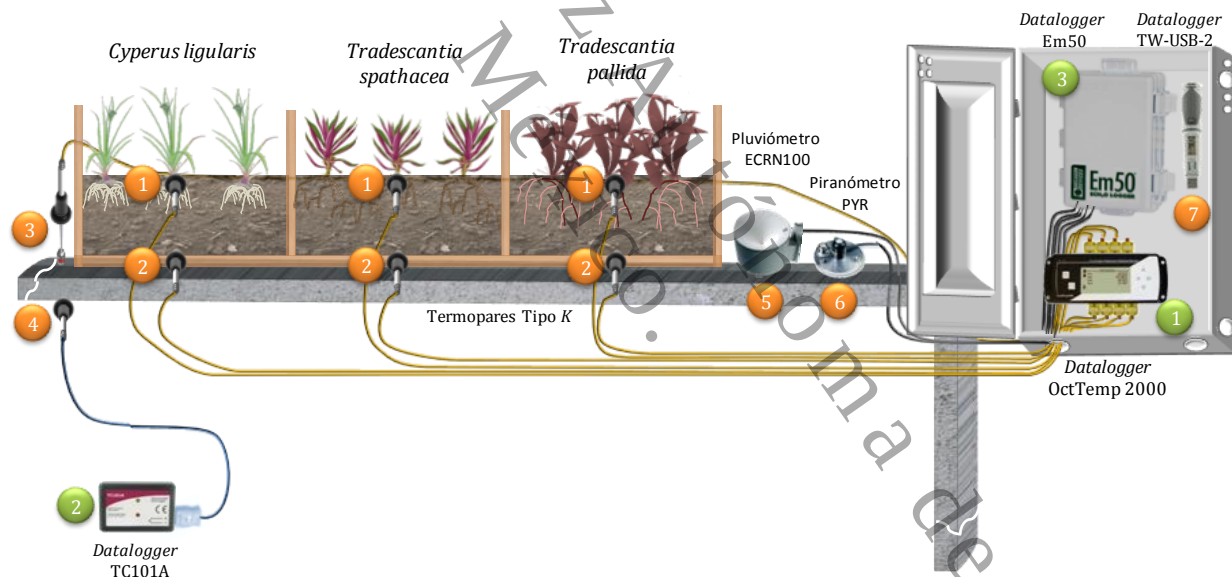


Figura 4. Sensores y registradores de las condiciones climatológicas en la unidad experimental de un techo verde extensivo.



Tabla 4. Listado de sensores y registradores empleados en la unidad experimental (ver Figura 4).

Número ID	Cantidad	Tipo	Modelo y marca	Variable
Sensores				
1	3	Termopar	Tipo K de uso genérico Daigger	Temperatura superior del sustrato
2	3	Termopar	Tipo K de uso genérico Daigger	Temperatura inferior del sustrato
3	2	Termopar	Tipo K de superficie Thermoworks Inc	Temperatura superficial del concreto
4	2	Termopar	Tipo T de uso genérico Daigger	Temperatura del techo en el interior del edificio
5	1	Pluviómetro	Decagon Devices Inc	Precipitación pluvial
6	1	Piranómetro	Decagon Devices Inc	Radiación solar
7	1	Termopar e higrómetro	TW-USB-2 Thermoworks Inc	Temperatura y humedad del ambiente
Registradores				
1	1	Registrador	OctTemp2000 de ThermoWorks Inc	Temperatura de los sensores 1, 2 y 3.
2	2	Registrador	TC101A de ThermoWorks Inc	Temperatura del sensor 4
3	1	Registrador	Em50 de Decagon Devices Inc	Datos de los sensores 5 y 6

Además, los impactos ambientales potenciales asociados al ciclo de vida de cada edificación son expresados en términos de masa equivalente de contaminantes producidos durante dichos proyectos. Finalmente, el consumo de combustible fósil es definido como la energía (en MegaJoules) empleada durante el ciclo de vida.

4.2. Sensibilidad Paramétrica

Un análisis de sensibilidad paramétrica es indispensable para conocer el efecto de algunos parámetros del ciclo de vida de una edificación de uso residencial sobre los potenciales de impacto ambiental. El análisis consiste en acotar los intervalos típicos de diseño y operación de las principales variables del techo verde, así como también los parámetros intrínsecamente asociados a la estimación del ahorro energético, como consecuencia de la instalación de un techo verde en pequeñas edificaciones de uso residencial, entre otras variables de interés.

Al respecto, los dos parámetros más importantes son el consumo de energía eléctrica en el edificio y la extensión superficial del techo, con o sin la instalación de un sistema verde de techado.



Con relación al consumo de energía eléctrica, Fuentes Velasco (2014) concluyó que el microclima existente dentro de la edificación no es afectado por los requerimientos de iluminación y equipo eléctrico sino por la operación de equipos de aire acondicionado. Esto se debe a la relación que existe entre el área de impacto del techo verde, la cantidad de equipos de aire acondicionado y la disminución de picos de temperatura causados por los fenómenos de transferencia de calor entre las plantas, el sustrato y la humedad de ambos con la placa de concreto, lo que conlleva a una menor carga térmica hacia el interior y por tanto, a un menor consumo de energía eléctrica por partes de estos equipos de acondicionamiento de aire. Para evaluar el efecto del consumo de energía eléctrica sobre los impactos potenciales se ha propuesto diversos consumos anuales de energía que son descritos en el Apartado 4.5.

Por su parte, para analizar el efecto de la extensión del techo verde sobre los impactos ambientales potenciales, en la Tabla 1 se han considerado diversos escenarios de edificación; entre ellos, se toma en cuenta el efecto de la superficie del techo con o sin la instalación de un techo verde.

4.3. **Software para análisis del ciclo de vida**

Como se estableció al inicio de este capítulo, se utilizaron dos programas de cómputo para realizar los análisis de ciclo de vida (estimación de impactos ambientales) y el análisis de ahorro energético empleando dos programas especializados.

Por su parte, se empleó el programa *ATHENA® Impact Estimator for Buildings*. *ATHENA* versión 4B (IE4B) el cual es un programa especializado en el análisis de ciclo de vida de edificaciones y permite incluir resultados de simulaciones de energía para calcular los efectos sobre la operación del mismo permitiendo la toma de decisiones sobre los aspectos térmicos del edificio. El *ATHENA Impact Estimator* está basado en la metodología del USEPA-TRACI (Bare, 2003; USEPA, 2007).



El IE4B basa la evaluación de impactos de ciclo de vida en la herramienta *EPA* de EUA (por sus siglas en inglés USEPA) para la reducción y evaluación de químicos y otros impactos ambientales y de conformidad con la norma ISO 21930/31.

El corazón de IE4B es la base de datos de inventario del ciclo de vida *Athena*, que contiene la más detallada, más alta calidad y datos de construcción regionalizados disponible en América del Norte. La base de datos LCI *Athena* se compone de ISO 14040/ 14044 unidad de datos de proceso LCI. Todos los datos tienen por lo general menos de 10 años de antigüedad.

El IE4B ha desarrollado datos no sólo para los materiales y productos de construcción, sino también para los procesos de uso de energía, transporte, construcción y demolición, incluyendo el montaje del edificio en el sitio de construcción, el mantenimiento, la reparación y efectos de reemplazo a través de la vida operacional, la demolición y eliminación.

Los perfiles ambientales de los productos de construcción y combustibles para energía de operación normalmente reflejan el promedio de la práctica de la industria, aunque los productos de marca de las instalaciones de fabricación específicos se añaden a las bases de datos según el criterio de los fabricantes individuales. Todos los datos son específicos de la región donde se encuentra el edificio; este es un aspecto importante para los cálculos del *LCA* y es una característica distintiva de la calidad de las bases de datos del *Athena Impact Estimator*.

En el IE4B se considera la generación de un inventario de materiales en términos de las etapas de un proyecto de edificación. En particular, para la etapa de construcción del edificio se establecieron las características de los materiales empleados para la cimentación, columnas y traveses, paredes y muros, puertas y ventanas, pisos, techos y otros elementos de obra civil o arquitectónica. Con respecto a la etapa de operación y mantenimiento, se han



establecido los consumos de energía eléctrica y de gas LP típicos de una edificación residencial durante su vida útil.

Con relación a la estimación de la demanda energética de edificios residenciales, Fuentes Velasco (2014) empleó *EnergyPlus*, un programa de análisis de energía y simulación de carga térmica, desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos de América. Éste fue diseñado con el propósito de determinar el equipo de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC por sus siglas en inglés) adecuado, desarrollar estudios de modificación para análisis de costos de ciclo de vida, optimizar el funcionamiento energético, entre otros. Tiene como base los programas BLAST y DOE-2, de los cuales tiene múltiples características de simulación. Mediante este programa es posible simular un modelo del consumo de energía de un edificio, de acuerdo a especificaciones estructurales definidas por el usuario. En la actualización de abril del 2007, *EnergyPlus* incluye un módulo nuevo para simular el balance de energía de un techo verde (US-DOE, 2012).

4.4. Inventario de la Etapa de Construcción

Para el análisis del inventario, se requirió definir los elementos que constituyen al proyecto. En este análisis, el proyecto de construcción de la edificación comprende los elementos siguientes: cimentación, columnas y trabes, paredes y muros, puertas y ventanas, pisos, materiales del techo y materiales extra. Dentro de estos materiales extra se incluyen los componentes del techo verde adicionales a los componentes de un techo convencional. En el techo verde extensivo se contemplan los siguientes materiales: i) membrana impermeable, ii) barrera de raíces, y iii) sistema de drenaje. Los materiales adicionales son el sustrato de crecimiento y la capa de vegetación mismos que no fueron incluidos en este análisis.

El sistema de **cimentación** seleccionado fue zapatas de concreto estableciendo la longitud de cada zapata de 10 m de acuerdo a las dimensiones de las viviendas.



un ancho de 0.80 m y un grosor de 0.3 m. Las varillas seleccionadas fueron las del #10M, la resistencia del concreto fue de 30 MPa y el porcentaje de la concentración de cenizas volátiles del cemento elegido fue el promedio (9%).

Las características de las **columnas y trabes** de concreto fueron las siguientes: se consideraron diferentes números de columnas para cada una de las viviendas conforme a las dimensiones y especificaciones de ellas, con alturas de 2.9 y 5.9 m para un nivel y para dos niveles, respectivamente. Los espaciamientos entre columna y columna fueron de 3.1 m, la separación entre una trabe y otra fue de 4 m y la carga de vida seleccionada fue la máxima manejada en el *software*, 4.8 kPa. El material de las **paredes y muros** es de hormigón y se establecieron las siguientes particularidades; altura de 2.9 m, las longitudes son variadas, en algunas se incluyeron **puertas** de madera hueca para interiores, puerta para exteriores de material de acero y 50% cristal, en otras, **ventanas** con marco de aluminio y cristal de doble hoja con aislamiento de aire (este tipo de cristal es el más sencillo que tiene disponible el *software*). Por su parte, debido a que no estaba disponible la selección de **portón** para cochera, en su lugar se consideraron 3 puertas de acero para exteriores en representación de los espacios ocupados por un portón.

El material seleccionado para el **piso** de las viviendas fue hormigón con diferentes dimensiones. El piso de la primera planta tanto de la vivienda de un solo nivel como la de dos niveles de 47 y 98 m² área de techo, tiene un área de 60 y 120 m² y el área del segundo piso fue de 42.6 y 75.3 m², respectivamente.

Para los **techos** el material seleccionado fue concreto en donde las dimensiones fueron de 47 y 98 m², la carga de vida de 4.8 kPa, la resistencia del concreto de 30 MPa y para el porcentaje de la concentración de cenizas volátiles del cemento fue seleccionada la opción promedio (9%).

Ahora bien, al momento de incorporar cada uno de los materiales que corresponden al techo verde no se encontraron disponibles algunos, por lo tanto,



en la sección de *materiales extra* se buscaron los materiales faltantes los cuales fueron el imprimador, la grava, barrera de raíces y capa de drenaje. Asimismo en *materiales extra* se ingresaron los materiales correspondientes a las escaleras de concreto (para las viviendas con dos niveles) y los mosaicos con los que van recubiertos los pisos de las viviendas así como las paredes de los baños.

4.5. Inventario de la Etapa de Operación y Mantenimiento

En la etapa de operación y mantenimiento se establecieron los años de operación de las viviendas y el consumo de energéticos típicos en hogares mexicanos, tales como la energía eléctrica y el gas LP. Asimismo, durante esta etapa se definieron los materiales que a lo largo de este periodo requieren de mantenimiento o de reemplazo.

Con respecto al consumo de energía eléctrica, se establecieron diferentes consumos anuales para las edificaciones establecidas en la Tabla 1. Para las viviendas con una superficie de techo de 47 m² de uno y dos niveles y sin un techo verde instalado, se emplearon tres niveles de consumo anuales en función del número de equipos de aire acondicionado en la vivienda, 5.5, 7 y 10 MW, los cuales corresponden a viviendas con 1, 2 y 3 equipos de aire acondicionado, respectivamente. Estos consumos fueron determinados de acuerdo a los resultados de simulaciones de energía realizadas en un estudio previo para una vivienda típica bajo las mismas condiciones y características definidas en esta investigación (Fuentes Velasco, 2014). De la misma manera, en ese estudio se demostró que la instalación de un techo verde podría reducir los consumos anuales de energía eléctrica a 5.2, 6.4 y 8.6 MW para viviendas con 1, 2 y 3 equipos de acondicionamiento de aire. En el caso de viviendas con un área de techado de 98 m² sin la instalación de un techo verde, los consumos anuales determinados fueron de 9, 12 y 17 MW cuando se emplean 1, 2 y 3 equipos de aire acondicionado, respectivamente; mientras que los consumos se redujeron a 8.3, 10.8 y 14.3 MW en caso de que un techo verde fuera instalado.



Como consecuencia del análisis de sensibilidad paramétrica y considerando los diferentes consumos anuales de energía eléctrica, los ocho escenarios de edificación se extienden a 24 escenarios, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Escenarios de edificación analizados en función del número de niveles, el consumo anual de energía y los tipos y áreas de techado.

Notación del escenario	Consumo eléctrico anual (MW)	Número de niveles	Área de techado (m ²)	Tipo de techado
1L-47CR-5.5 MW	5.5	1	47	Convencional (gris)
1L-47CR-7.0 MW	7.0			
1L-47CR-10.0 MW	10.0			
2L-47CR-5.5 MW	5.5	2		
2L-47CR-7.0 MW	7.0			
2L-47CR-10.0 MW	10.0			
1L-47GR-5.2 MW	5.2	1	47	Verde
1L-47GR-6.4 MW	6.4			
1L-47GR-8.6 MW	8.6			
2L-47GR-5.2 MW	5.2	2		
2L-47GR-6.4 MW	6.4			
2L-47GR-8.6 MW	8.6			
1L-98CR-9.0 MW	9.0	1	98	Convencional (gris)
1L-98CR-12.0 MW	12.0			
1L-98CR-17.0 MW	17.0			
2L-98CR-9.0 MW	9.0	2		
2L-98CR-12.0 MW	12.0			
2L-98CR-17.0 MW	17.0			
1L-98GR-8.3 MW	8.3	1	98	Verde
1L-98GR-10.8 MW	10.8			
1L-98GR-14.3 MW	14.3			
2L-98GR-8.3 MW	8.3	2		
2L-98GR-10.8 MW	10.8			
2L-98GR-14.3 MW	14.3			

Por su parte, el consumo anual de gas LP no varía significativamente en viviendas típicas de la región debido a que este energético se emplea particularmente para



la preparación de alimentos. Por ello, se consideró un valor constante de 530 L anuales para todas las viviendas de acuerdo al consumo anual per cápita de 68 kg basado en el informe de *Prospectiva del mercado de Gas LP 2009-2024* por parte del gobierno mexicano (SENER, 2009).

Es importante mencionar que de los materiales ingresados como *materiales extra* no se cuenta con información disponible sobre los tiempos de reemplazo y por lo tanto se desconocen sus efectos en los impactos ambientales que corresponderían a dicha etapa.

4.6. El Análisis del inventario

El análisis del inventario es la etapa en la que los límites del sistema fueron definidos. Su resultado principal es una tabla de inventario de los insumos cuantificados de salidas para el medio ambiente asociados; por ejemplo, en términos de kg de dióxido de carbono, mg de fenol, kg de mineral de hierro, metros cúbicos de gas natural, entre otros.

Dicho inventario se llevó a cabo empleando el *Athena Impact Estimator for Buildings*. Este *software* es de origen estadounidense por lo que en su base de datos de localidades contiene únicamente ciudades de algunos estados de la unión americana y de Canadá. Dado que la energía es el insumo principal para el transporte y para la industria de la transformación, se seleccionó la localidad con la mayor similitud a las fuentes mexicanas de generación de energía. Empleando este criterio, un análisis comparativo mostró que, de acuerdo con los datos publicados en la Administración de Información de Energía de los Estados Unidos (EIA por sus siglas en inglés, *United States Energy Information Administration*) y la información obtenida en el INEGI (Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática), la ciudad de Miami, Florida presentó similitud significativa con México en cuanto a la proporción de energía eléctrica producida a partir de fuentes renovables y no renovables, como se muestra en la Tabla 6.



Para el inventario de ciclo de vida se estableció una esperanza de vida de 40 años, dentro de los cuales el *software* considera el reemplazo y/o mantenimiento de los materiales de techo, paredes y muros después de los 20 años de uso de las viviendas.

Tabla 6. Comparación de la producción de energía eléctrica en Florida y México en términos de las fuentes de generación.

Fuente de energía	Proporción de Generación (%)	
	Florida ^a	México ^b
Termoeléctrica (Gas natural, petróleo, combustóleo, diesel)	62.6	59.9
Carboeléctrica	23.2	13.8
Nuclear	12.2	6.8
Otras renovables	2.1	3.6
Hidroeléctrica	-	15.9

Fuentes: ^a United States Energy Information Administration (2014)

^b Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (2010).

Entre los impactos ambientales negativos relacionados a la instalación de las edificaciones podrían encontrarse los siguientes: impacto potencial al **calentamiento global** debido a la emisión de gases de efecto invernadero, la **acidificación** que causa la degradación de metales, materiales de construcción, deforestación y daño a la vida acuática; la **eutrofización** como resultado de la emisión de nutrientes que causen el crecimiento excesivo de algas y cuya degradación causa un consumo desmedido de oxígeno con la consecuente pérdida de vida; la producción de **smog fotoquímico** como consecuencia de la combinación de contaminantes atmosféricos, la **pérdida de recursos abióticos** causada por la extracción y consumo de materiales no renovables tales como petróleo, carbón, minerales y metales; la **producción de residuos peligrosos** creados durante el ciclo de vida del proyecto; y la **producción de emisiones tóxicas** que causen daño a la salud humana y a los ecosistemas.

Los resultados del análisis de inventario de ciclo de vida se presentan en unidades del Sistema Internacional (SI), para cada una de las etapas del ciclo y para cada uno de los ensamblajes se presentan las emisiones al suelo, las emisiones al agua y las emisiones al aire, además del consumo de energía (en MJ).



5. EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE EDIFICIOS RESIDENCIALES

En este capítulo se presentan los resultados de los escenarios de edificación establecidos en el Capítulo de Métodos. Por cuestiones de comprensión y espacio, en este capítulo se presentan únicamente los resultados más relevantes de algunos de los escenarios. El consumo de combustible fósil y los impactos ambientales potenciales son descritos para estos escenarios y, finalmente, se presenta un análisis de sensibilidad para mostrar el efecto de algunos parámetros del proyecto de edificación sobre la estimación de impactos ambientales.

5.1. El consumo de combustible fósil y los potenciales de impacto ambiental.

El consumo de combustibles fósiles (Carbón, diesel, gasolina, crudo, combustible de aceite pesado, gas licuado de petróleo y gas natural) y los potenciales de impacto ambiental (calentamiento global, acidificación, daño a la salud, eutrofización, agotamiento de la capa de ozono y smog) son los parámetros cuantitativos más importantes en un análisis de ciclo de vida. En la Tabla 7 se presentan estos parámetros para una vivienda de un solo nivel con una superficie de techo convencional (gris) de 47 m² y un gasto de energía eléctrica de 5.5 MW/año y en la Tabla 8 se muestran los parámetros para la misma vivienda con un techo verde instalado sobre ella y un gasto de 5.2 MW/año.

Una comparación de los resultados indican que el incremento en el consumo de combustibles fósiles es de 1.5% correspondiente a las etapas de **manufactura, construcción, instalación, reemplazo, desmantelamiento y demolición** (398,452 MJ requeridos por un edificio con techo gris en comparación a 404,627 MJ requeridos por un edificio con techo verde). Este incremento se debe a la energía necesaria para producir, instalar y desmantelar los materiales extra



necesarios para el sistema verde de techado. Asimismo, para estas mismas etapas, la instalación de un techo verde produce aumentos en comparación a un techo convencional (gris) hasta del 1.3% en los impactos ambientales potenciales, siendo el agotamiento de la capa de ozono el de menor incremento (<0.1%), seguido de 0.3% correspondientes a los potenciales de eutrofización, materia particulada y de smog; y finalmente de 0.4 y 1.3% para los potenciales de calentamiento global y de acidificación, respectivamente.

Tabla 7. Resumen del consumo de combustible fósil e impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida de una vivienda de acuerdo al escenario 1L-47CR-5.5 MW (Vivienda de un solo nivel, con techo convencional de 47 m² y un consumo anual de energía de 5.5 MW.

ETAPA	Procesos	Potenciales de impacto					Energías		
		Calentamiento global	Acidificación	Materia particulada	Eutrofización	Smog	Primaria	No renovables	Combustible fósil
		kg CO ₂ eq	kg SO ₂ eq	kg PM _{2.5} eq	kg N eq	kg O ₃ eq	MJ	MJ	MJ
PRODUCCIÓN	Manufactura	32692.4	150.3	78.0	3.8	1755.9	355583.0	354776.7	313846.1
	Transporte	795.0	7.5	0.4	0.5	261.7	10630.4	10625.1	10605.9
	Subtotal	33487.4	157.8	78.4	4.3	2017.7	366213.3	365401.9	324452.0
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	2229.0	13.9	3.3	0.6	341.4	23908.4	23864.6	23038.9
	Transporte	1432.1	13.8	0.8	0.9	480.3	19150.9	19141.6	19107.0
	Subtotal	3661.1	27.7	4.1	1.6	821.8	43059.3	43006.2	42145.9
USO	Reemplazo	1239.1	8.7	1.6	6.3	91.6	46997.3	46861.2	45799.1
	Transporte por reemplazo	72.2	0.7	0.0	0.1	26.0	974.6	974.1	972.4
	Uso anual de energía en la operación	199926.7	1366.1	115.5	18.8	6862.5	3218805.8	3191983.2	3039514.1
	Subtotal	201238.1	1375.5	117.2	25.2	6980.1	3266777.7	3239818.5	3086285.5
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	1055.8	13.0	0.8	0.8	431.9	15920.6	15895.9	15767.4
	Transporte	633.9	5.7	0.3	0.4	198.6	7734.8	7730.7	7715.4
	Subtotal	1689.7	18.7	1.1	1.2	630.5	23655.4	23626.6	23482.7
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	2451.3	5.6	2.5	0.3	57.0	11276.5	11276.5	22624.0
	Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Subtotal	2451.3	5.6	2.5	0.3	57.0	11276.5	11276.5	22624.0
Procesos que no involucran transporte		37216.4	185.9	83.6	11.5	2620.9	442409.2	441398.5	398451.5
Procesos que involucran transporte		2933.2	27.8	1.6	1.9	966.6	38490.7	38471.5	38400.6
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	240076.3	1579.8	200.8	32.3	10450.0	3699705.7	3671853.2	3476366.2
	Producción hasta después del Fin de vida	242527.6	1585.4	203.2	32.5	10507.0	3710982.2	3683129.7	3498990.2



Tabla 8. Resumen del consumo de combustible fósil e impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida de una vivienda de acuerdo al escenario 1L-47GR-5.2 MW (Vivienda de un solo nivel, con techo verde de 47 m² y un consumo anual de energía de 5.2 MW).

ETAPA	Procesos	Potenciales de impacto					Energías		
		Calentamiento global kg CO ₂ eq	Acidificación kg SO ₂ eq	Materia particulada kg PM _{2.5} eq	Eutrofización kg N eq	Smog kg O ₃ eq	Primaria MJ	No renovables MJ	Combustible fósil MJ
PRODUCCIÓN	Manufactura	32830.1	152.5	78.2	3.8	1760.6	361609.8	360787.2	319770.9
	Transporte	798.1	7.6	0.4	0.5	262.7	10668.2	10663.0	10643.6
	Subtotal	33628.2	160.0	78.6	4.3	2023.3	372278.0	371450.2	330414.5
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	2240.7	14.1	3.3	0.6	345.8	24161.0	24116.9	23289.3
	Transporte	1465.0	14.1	0.8	1.0	491.3	19594.3	19584.8	19549.4
	Subtotal	3705.7	28.2	4.1	1.6	837.1	43755.4	43701.7	42838.7
USO	Reemplazo	1239.1	8.7	1.6	6.3	91.6	46997.3	46861.2	45799.1
	Transporte por reemplazo	72.2	0.7	0.0	0.1	26.0	974.6	974.1	972.4
	Uso anual de energía en la operación	191264.8	1294.8	109.5	18.1	6574.8	3076222.1	3050849.3	2906648.3
	Subtotal	192576.2	1304.2	111.1	24.4	6692.4	3124193.9	3098684.6	2953419.8
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	1055.8	13.0	0.8	0.8	431.9	15920.6	15895.9	15767.4
	Transporte	642.0	5.8	0.3	0.4	201.1	7834.1	7829.8	7814.3
	Subtotal	1697.8	18.8	1.1	1.2	633.0	23754.6	23725.8	23581.7
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	2451.3	5.6	2.5	0.3	57.0	11276.5	11276.5	22624.0
	Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Subtotal	2451.3	5.6	2.5	0.3	57.0	11276.5	11276.5	22624.0
Procesos que no involucran transporte		37365.7	188.2	83.9	11.6	2629.9	448688.7	447661.3	404626.7
Procesos que involucran transporte		2977.3	28.2	1.6	1.9	981.1	39071.2	39051.7	38979.7
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	231607.8	1511.3	195.0	31.5	10185.8	3563981.9	3537562.2	3350254.7
	Producción hasta después del Fin de vida	234059.1	1516.9	197.5	31.8	10242.8	3575258.4	3548838.7	3372878.8

En referencia a los efectos totales durante el ciclo de vida, debe notarse que es posible agrupar los impactos potenciales en dos categorías: los efectos desde la etapa de **Producción** hasta la de **Fin de Vida**, y los efectos desde la etapa de **Producción** hasta la de **Después del Fin de Vida**. Ambas categorías corresponden a un análisis *cradle to grave*; sin embargo, la primera considera únicamente la energía requerida para transportar los materiales a un relleno sanitario, y la segunda categoría incluye además los procesos de operación en el



relleno sanitario. Con respecto a estos efectos totales, la diferencia porcentual entre ambas categorías es de 1% en los ocho escenarios base.

Como se observa en las Tablas 7 y 8, el consumo de combustible fósil debido al **transporte** durante todo el ciclo de vida de los materiales de las viviendas incrementó en un 1.5% cuando se instala un techo verde (38400.6 MJ por un techo convencional y 38979.7 MJ de un techo verde). El aumento de los impactos potenciales (*i.e.* acidificación, eutrofización, smog; materia particulada, agotamiento de la capa de ozono y calentamiento global) debido a la actividad de transporte fueron de 1.5%.

De acuerdo al análisis del ciclo de vida, la instalación de un techo verde en el edificio de un solo nivel y 47 m² disminuyó el **consumo de combustible fósil** durante la **etapa de operación** en un 4.4%, en comparación al edificio con techo convencional (escenario 1L-47GR-5.2MW *versus* 1L-47CR-5.5MW). Asimismo, el edificio con techo verde disminuyó el potencial de impactos ambientales. Al respecto, las mayores disminuciones se observan en la materia particulada y el potencial de acidificación con 5.2%; seguidos por el potencial de calentamiento global con 4.3% y el potencial de smog con 4.2%, continuando con el potencial de eutrofización con 4.1%, el menor decremento se observa en el potencial de agotamiento de la capa de ozono con un 0.6%.

En referencia a los **efectos totales**, el uso de un techo verde en la vivienda de un solo y 47 m² durante 40 años de vida útil reducen el **consumo de combustible fósil** en un 3.6% en comparación al edificio con techo convencional. De la misma manera, los impactos potenciales se redujeron obteniéndose los mayores decrementos en el potencial de acidificación (4.3%), el potencial de calentamiento global (3.5%), la materia particulada (2.9%) y el potencial de smog (2.5%), seguido por el potencial de eutrofización con una disminución del 2.2%, para el potencial de agotamiento de ozono se registran valores por debajo de 0.00028 kg eq CFC-11 para este se registran disminuciones del 0.004%.



Ahora bien, para el resto de los escenarios descritos en la Tabla 5, los cuales varían en superficie de techado y en el número de niveles, se reportan incrementos en el consumo de combustible fósil para los procesos que no involucran transporte (**manufactura, construcción, instalación, reemplazo, desmantelamiento y demolición**) que van de 1.1 a 1.4%. Asimismo, aumenta el consumo de combustible fósil por las actividades de **transporte** en un rango de 0.9 a 1.3%. Los impactos ambientales potenciales debido a los materiales extra de un techo verde van de 0.01 a 1.2% para los procesos que no involucran transporte, mientras que varían de 0.9 a 1.3%, para las actividades de transporte.

En el resto de los escenarios, los ahorros de combustible fósil y los decrementos de los impactos ambientales potenciales debido al empleo de un techo verde, se ven reflejados durante la **etapa de uso** en donde se presentan ahorros de combustible que van de 4.4 a 14.7% y decrementos en las emisiones al ambiente que van de 0.6 a 15.7%.

Con respecto a los **efectos totales** para el resto de los escenarios definidos en la Tabla 5, los edificios con techo verde presentaron un ahorro de combustible fósil de 3.5 a 13.2% en comparación al edificio con techo convencional. Por su parte, las disminuciones en los impactos ambientales potenciales van de 2 a 14.2%. El escenario que resultó con las mayores reducciones porcentuales de consumo de combustible fósil y de potenciales de impacto fue la edificación de un solo nivel con una superficie de techo verde de 98 m² y un consumo anual de electricidad de 14.3 MW (escenario 1L-98GR-14.3MW en comparación al escenario 1L-98CR-17.0MW; ambos edificios con tres equipos de acondicionamiento de aire).

En el **Anexo A** se presentan las tablas de resumen de impacto y consumo de combustible fósil de todos los escenarios, en las cuales se muestran los resultados de las emisiones y/o consumos **por etapa** (manufactura, construcción e instalación, reemplazo, operación y mantenimiento, transporte, disposición final al término de la vida útil de los materiales).



De la misma manera, en el **Anexo B** se muestran las tablas para el uso de recursos (materias primas) y consumo de energía con los datos de las emisiones y/o consumos **por componente de construcción** (cimientos, muros y paredes, columnas y trabes, techos, pisos y materiales extra).

Como se mencionó anteriormente, se consideraron variaciones en los consumos anuales de energía eléctrica en los edificios en función del número de equipos de acondicionamiento de aire (Ver Apartado 4.5). En referencia a esto, los incrementos en el consumo de combustible fósil y en los impactos ambientales potenciales resultaron en una tendencia lineal con respecto a dicho consumo de energía es decir, por cada MW consumido anualmente durante la etapa de operación (uso) los impactos ambientales y consumo de combustible fósil se comportan de la siguiente manera:

$$1028.1 + 721.8 \times E = \text{Potencial de Cambio climático (kg CO}_2 \text{ eq)}$$

$$1.5 \text{ kg} + 5.9 \times E = \text{Potencial de Acidificación (kg SO}_2 \text{ eq)}$$

$$0.1 \text{ kg} + 0.5 \times E = \text{Materia Particulada (kg PM}_{2.5} \text{ eq)}$$

$$0.1 \text{ kg} + 0.1 \times E = \text{Potencial de Eutrofización (kg N eq)}$$

$$39.7 + 24 \times E = \text{Potencial de Smog (kg O}_3 \text{ eq)}$$

$$15091 + 11072.1 \times E = \text{Consumo de Combustible Fósil (MJ)}$$

donde E es la energía anual consumida en la edificación. Centrando nuestra atención en las reducciones de consumo de energía y de los impactos ambientales potenciales en los que se observaron las mayores reducciones al usar un techo verde en vez de un techo convencional, se presentan a continuación cinco tablas en las cuales se muestran dichas categorías con los ocho escenarios. La primera (Tabla 9) corresponde a los consumos de combustible fósil; en la siguiente (Tabla 10) se presenta el potencial de acidificación como emisiones de kg SO₂ eq., en la siguiente (Tabla 11) el potencial de calentamiento global como emisiones de kg CO₂ eq.; en la tabla (Tabla 12) que sigue, materia particulada expresada como kg PM_{2.5} eq.; y en la última (Tabla 13) se listan los valores del potencial de smog como kg O₃ eq.



Tabla 9. Consumo de combustible fósil expresado en MJ durante la vida útil de ocho escenarios de edificación seleccionados.

ETAPA	Procesos	Consumo de combustible fósil (MJ)							
		1L-47CR-5.5MW	1L-47GR-5.2MW	1L-98CR-9MW	1L-98GR-8.3MW	2L-47CR-5.5MW	2L-47GR-5.2MW	2L-98CR-9MW	2L-98GR-8.3MW
PRODUCCIÓN	Manufactura	313846.1	319770.88	582308.58	592727.67	438042.61	443967.35	787484.06	797903.15
		96.73%	96.78%	96.59%	96.64%	96.91%	96.95%	96.68%	96.72%
	Transporte	10605.9	10643.62	20537.82	20598.26	13944.24	13981.96	27018.67	27079.11
		3.27%	3.22%	3.41%	3.36%	3.09%	3.05%	3.32%	3.28%
	Subtotal	324452.0	330414.50	602846.40	613325.93	451986.85	457949.32	814502.73	824982.25
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	23038.90	23289.32	44338.86	44759.29	33751.99	34002.41	62778.15	63198.58
		54.66%	54.37%	56.30%	56.02%	53.17%	52.99%	54.93%	54.75%
	Transporte	19107.0	19549.42	34411.51	35134.18	29727.43	30169.83	51513.97	52236.64
		45.34%	45.63%	43.70%	43.98%	46.83%	47.01%	45.07%	45.25%
	Subtotal	42145.9	42838.74	78750.36	79893.47	63479.42	64172.24	114292.12	115435.23
USO	Reemplazo	45799.1	45799.09	92932.80	92932.80	49234.17	49234.17	98703.81	98703.81
		1.48%	1.55%	1.98%	2.12%	1.59%	1.67%	2.10%	2.25%
	Transporte por reemplazo	972.3	972.37	1902.62	1902.62	1045.09	1045.09	2019.53	2019.53
		0.03%	0.03%	0.04%	0.04%	0.03%	0.04%	0.04%	0.05%
	Uso de energía de operación	3039514.1	2906648.31	4589614.63	4279594.52	3039514.07	2906648.31	4589614.63	4279594.52
		98.48%	98.42%	97.98%	97.83%	98.37%	98.30%	97.85%	97.70%
	Subtotal	3086285.5	2953419.76	4684450.05	4374429.94	3089793.33	2956927.57	4690337.98	4380317.86
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	15767.4	15767.38	30080.95	30080.95	21186.28	21186.28	40045.52	40045.52
		67.14%	66.86%	67.63%	67.38%	65.26%	65.06%	66.08%	65.91%
	Transporte	7715.4	7814.34	14400.29	14560.01	11277.33	11376.31	20556.97	20716.68
		32.86%	33.14%	32.37%	32.62%	34.74%	34.94%	33.92%	34.09%
	Subtotal	23482.7	23581.72	44481.24	44640.96	32463.60	32562.58	60602.48	60762.20
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	22624.0	22624.05	42158.56	42158.56	35922.51	35922.51	63244.64	63244.64
		100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Transporte	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Subtotal	22624.0	22624.05	42158.56	42158.56	35922.51	35922.51	63244.64	63244.64
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	3476366.2	3350254.71	5410528.06	5112290.29	3637723.21	3511611.71	5679735.31	5381497.54
	Producción hasta después del tiempo de vida	3498990.2	3372878.76	5452686.62	5154448.85	3673645.71	3547534.22	5742979.95	5444742.18

Durante la etapa de **producción** de los materiales los procesos de **manufactura** y **transporte** en cada uno de los ocho escenarios mantuvieron aproximadamente la misma proporción respecto al consumo total de combustible fósil para dicha etapa. Las proporciones fueron de 96.6 a 97.0% para el primer proceso y de 3.1 a 3.4% para transporte.



De la misma forma que la etapa anterior, para el **proceso constructivo** los procesos de **construcción e instalación y transporte**, mantienen proporciones semejantes en cada uno de los ocho escenarios, entre 53.0 a 56.3% para el primer proceso.

Para la etapa de **uso** se incluyen tres procesos que consumen combustible fósil: **reemplazo, transporte y el uso anual de energía para la operación** de las viviendas, de esta última el porcentaje que se presenta corresponde a los 40 años de vida útil establecido. De estos tres procesos la que mantienen la mayor proporción respecto a ésta etapa en los ocho escenarios es el uso de energía eléctrica, la cual va de 97.7 a 98.5% en donde los porcentajes más elevados corresponden a las viviendas con techo convencional (gris).

La etapa que corresponde al **fin de vida** de los materiales de las viviendas, está conformada por dos procesos: **desmantelamiento-demolición y transporte**, de las cuales la primera es la que mayor gasto de combustible implica, representando una proporción que va desde 65.1 a 67.6%, siendo los porcentajes menores los de las viviendas con techo verde.

En términos de **efectos totales**, a lo largo de los procesos de todo el ciclo de vida de las viviendas, la que mayor proporción representa es el consumo de combustibles fósiles (durante 40 años) en cada uno de los ocho escenarios es el **uso de energía** para la operación de las viviendas. De acuerdo a la tabla, las proporciones respecto al total por este proceso fueron decreciendo de izquierda a derecha, siendo siempre las viviendas con techo verde las que menor porcentaje presentan debido al ahorro energético que conlleva este tipo de techo.



Tabla 10. Potencial de acidificación expresada como emisiones de SO₂ a lo largo de 40 años de ciclo de vida de las viviendas.

ETAPA	Procesos	Potencial de acidificación (kg SO ₂ eq)							
		1L-47CR-5.5MW	1L-47GR-5.2MW	1L-98CR-9MW	1L-98GR-8.3MW	2L-47CR-5.5MW	2L-47GR-5.2MW	2L-98CR-9MW	2L-98GR-8.3MW
PRODUCCIÓN	Manufactura	150.29	152.47	277.65	281.48	213.88	216.07	385.54	389.37
		95.23%	95.28%	95.01%	95.06%	95.58%	95.61%	95.26%	95.30%
	Transporte	7.52	7.55	14.58	14.62	9.89	9.91	19.17	19.22
		4.77%	4.72%	4.99%	4.94%	4.42%	4.39%	4.74%	4.70%
	Subtotal	157.81	160.03	292.23	296.10	223.77	225.98	404.72	408.59
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	13.93	14.09	26.08	26.35	20.43	20.59	37.26	37.53
		50.22%	49.95%	51.22%	50.96%	48.77%	48.61%	50.07%	49.90%
	Transporte	13.81	14.12	24.84	25.36	21.46	21.77	37.16	37.68
		49.78%	50.05%	48.78%	49.04%	51.23%	51.39%	49.93%	50.10%
	Subtotal	27.74	28.22	50.92	51.70	41.89	42.37	74.42	75.20
USO	Reemplazo	8.66	8.66	16.50	16.50	10.82	10.82	20.12	20.12
		0.63%	0.66%	0.74%	0.81%	0.79%	0.83%	0.91%	0.98%
	Transporte por reemplazo	0.75	0.75	1.46	1.46	0.80	0.80	1.55	1.55
		0.05%	0.06%	0.07%	0.07%	0.06%	0.06%	0.07%	0.08%
	Uso de energía de operación	1366.11	1294.82	2197.79	2031.45	1366.11	1294.82	2197.79	2031.45
		99.32%	99.28%	99.19%	99.12%	99.16%	99.11%	99.02%	98.94%
	Subtotal	1375.52	1304.23	2215.75	2049.42	1377.73	1306.44	2219.46	2053.13
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	13.01	13.01	25.00	25.00	17.19	17.19	32.90	32.90
		69.47%	69.20%	70.09%	69.86%	67.29%	67.10%	68.35%	68.19%
	Transporte	5.72	5.79	10.67	10.79	8.36	8.43	15.23	15.35
		30.53%	30.80%	29.91%	30.14%	32.71%	32.90%	31.65%	31.81%
	Subtotal	18.73	18.80	35.67	35.79	25.55	25.62	48.13	48.25
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	5.64	5.64	10.51	10.51	8.95	8.95	15.77	15.77
	Transporte	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Subtotal	5.64	5.64	10.51	10.51	8.95	8.95	15.77	15.77
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	1579.79	1511.27	2594.57	2433.01	1668.93	1600.41	2746.73	2585.17
	Producción hasta después del tiempo de vida	1585.43	1516.91	2605.08	2443.52	1677.89	1609.36	2762.50	2600.93

Las mayores emisiones de SO₂ en la etapa de **producción** están representadas por **manufactura** abarcando del 95.0 al 95.6% del total de las emisiones en dicha etapa para cada uno de los ocho escenarios.

Durante la etapa del **proceso constructivo** el proceso de **construcción e instalación** muestra proporciones de 48.6 hasta 51.2%.



Asimismo en la etapa de **uso** las mayores emisiones se dan por el **uso de la energía** eléctrica para la operación de las viviendas a lo largo de 40 años, siendo a partir del 99%.

Para el **fin de vida** de los materiales de las edificaciones, el **desmantelamiento-demolición** representa proporciones que van de 67.1 a 70.1%.

En términos de **efectos totales** a lo largo de 40 años del ciclo de vida, el proceso que representa las mayores emisiones de SO_2 es el **uso de energía operacional** con porcentajes de 78.6 a 86.5%. Sin embargo, estas son las proporciones respecto a las emisiones totales de SO_2 ya que visualizando como tal los kilogramos de SO_2_{eq} , se tienen mayores emisiones en los escenarios 3-4 y 7-8 que son las viviendas con mayor extensión (casi el doble que el de las otras). El segundo lugar en emisiones es, en su conjunto, los procesos de manufactura, construcción-instalación, reemplazo y desmantelamiento-demolición, abarcando del 11.8 al 18.6%.



El potencial de calentamiento global cuantificado como kilogramos de CO₂, está correlacionado con el consumo de combustibles fósiles.

Tabla 11. Potencial de calentamiento global expresadas como emisiones de CO₂ a lo largo de 40 años de ciclo de vida de las viviendas.

ETAPA	Procesos	Potencial de calentamiento global (kg CO ₂ eq)							
		1L-47CR-5.5MW	1L-47GR-5.2MW	1L-98CR-9MW	1L-98GR-8.3MW	2L-47CR-5.5MW	2L-47GR-5.2MW	2L-98CR-9MW	2L-98GR-8.3MW
PRODUCCIÓN	Manufactura	32692.41	32830.11	60045.32	60286.54	46906.09	47043.79	83838.75	84079.96
		97.63%	97.63%	97.50%	97.50%	97.82%	97.82%	97.64%	97.64%
	Transporte	795.02	798.09	1540.12	1545.03	1044.75	1047.82	2025.59	2030.51
		2.37%	2.37%	2.50%	2.50%	2.18%	2.18%	2.36%	2.36%
	Subtotal	33487.44	33628.21	61585.44	61831.57	47950.84	48091.61	85864.34	86110.47
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	2229.03	2240.69	4215.90	4235.04	3270.96	3282.62	5989.35	6008.49
		60.88%	60.47%	62.01%	61.63%	59.56%	59.29%	60.80%	60.55%
	Transporte	1432.06	1464.98	2582.63	2636.38	2221.25	2254.16	3861.16	3914.91
		39.12%	39.53%	37.99%	38.37%	40.44%	40.71%	39.20%	39.45%
	Subtotal	3661.09	3705.67	6798.53	6871.41	5492.21	5536.78	9850.51	9923.40
USO	Reemplazo	1239.12	1239.12	2337.43	2337.43	1495.95	1495.95	2768.35	2768.35
		0.62%	0.64%	0.77%	0.83%	0.74%	0.78%	0.91%	0.98%
	Transporte por reemplazo	72.24	72.24	141.38	141.38	77.63	77.63	150.02	150.02
		0.04%	0.04%	0.05%	0.05%	0.04%	0.04%	0.05%	0.05%
	Uso de energía de operación	199926.72	191264.79	300982.58	280771.41	199926.72	191264.79	300982.58	280771.41
	Subtotal	201238.08	192576.15	303461.39	283250.22	201500.30	192838.37	303900.94	283689.77
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	1055.81	1055.81	2015.45	2015.45	1416.79	1416.79	2680.59	2680.59
		62.49%	62.19%	63.01%	62.75%	60.46%	60.25%	61.35%	61.16%
	Transporte	633.86	641.99	1183.07	1196.19	926.49	934.62	1688.87	1701.99
		37.51%	37.81%	36.99%	37.25%	39.54%	39.75%	38.65%	38.84%
	Subtotal	1689.66	1697.80	3198.52	3211.64	2343.28	2351.41	4369.46	4382.58
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	2451.32	2451.32	4586.08	4586.08	3897.36	3897.36	6885.34	6885.34
	Transporte	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Subtotal	2451.32	2451.32	4586.08	4586.08	3897.36	3897.36	6885.34	6885.34
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	240076.28	231607.82	375043.87	355164.84	257286.63	248818.17	403985.25	384106.22
	Producción hasta después del tiempo de vida	242527.61	234059.15	379629.95	359750.91	261184.00	252715.54	410870.60	390991.56

Durante la etapa de **producción** los procesos muestran las mismas proporciones respecto al total de las emisiones de dicha etapa. Siendo el proceso con mayor proporción en cada escenario la **manufactura** que va de 97.5 a 97.8%.



En la etapa de **proceso constructivo**, los procesos de **construcción e instalación** representan entre el 59.3 al 62.0% de emisiones para esta etapa en todos los escenarios.

Para la etapa de **uso** el proceso que más emisiones presenta es el **uso de energía** para la operación de las viviendas (durante 40 años), representando poco más del 99% en todos los casos.

La última etapa, **fin de vida** de los materiales, esta mayormente representada por la etapa de **desmantelamiento y demolición** con proporciones de entre 60.3 y 62.8%.

Al comparar los escenario 1 contra el 2, el 3 contra el 4 y así sucesivamente, las proporciones en cuanto emisiones de CO₂ para fines prácticos no varían. Sin embargo, considerando todos estos ya como **efectos totales**, el proceso que mayor proporción representa en las emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida de 40 años, es el **uso de energía** para la operación de las viviendas. Considerando el orden de los escenarios en la tabla, las proporciones de emisiones respecto al total por este proceso fueron decreciendo de izquierda a derecha, siendo siempre las viviendas con techo verde las que menor porcentaje presentan debido al ahorro energético que conlleva este tipo de techo. Las viviendas de dos niveles presentan los menores porcentajes con respecto al total.

Las emisiones de las partículas suspendidas PM_{2.5} son de interés debido a los efectos negativos de éstas sobre la salud humana.

Al igual que en las tablas anteriores, durante el proceso de **producción** el proceso que mayor proporción abarcó en esta etapa es la **manufactura**, representando más del 99% de las emisiones de materia particulada, este fue el caso para todos los escenarios.



Tabla 12. Materia particulada expresadas como PM_{2.5} eq, durante el ciclo de vida de las viviendas.

ETAPA	Procesos	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)							
		1L-47CR-5.5MW	1L-47GR-5.2MW	1L-98CR-9MW	1L-98GR-8.3MW	2L-47CR-5.5MW	2L-47GR-5.2MW	2L-98CR-9MW	2L-98GR-8.3MW
PRODUCCIÓN	Manufactura	77.95	78.20	142.79	143.22	113.50	113.75	201.69	202.12
		99.45%	99.45%	99.42%	99.42%	99.50%	99.50%	99.46%	99.46%
	Transporte	0.43	0.43	0.84	0.84	0.57	0.57	1.10	1.11
		0.55%	0.55%	0.58%	0.58%	0.50%	0.50%	0.54%	0.54%
	Subtotal	78.38	78.64	143.63	144.06	114.06	114.32	202.79	203.23
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	3.32	3.33	6.06	6.07	4.86	4.87	8.61	8.62
		80.90%	80.58%	81.08%	80.79%	79.98%	79.76%	80.29%	80.09%
	Transporte	0.78	0.80	1.41	1.44	1.22	1.24	2.11	2.14
		19.10%	19.42%	18.92%	19.21%	20.02%	20.24%	19.71%	19.91%
	Subtotal	4.11	4.13	7.47	7.51	6.08	6.11	10.72	10.77
USO	Reemplazo	1.57	1.57	2.54	2.54	1.76	1.76	2.84	2.84
		1.34%	1.42%	1.35%	1.46%	1.50%	1.58%	1.50%	1.63%
	Transporte por reemplazo	0.04	0.04	0.08	0.08	0.04	0.04	0.09	0.09
		0.04%	0.04%	0.04%	0.05%	0.04%	0.04%	0.05%	0.05%
	Uso de energía de operación	115.54	109.50	186.02	171.92	115.54	109.50	186.02	171.92
		98.62%	98.55%	98.61%	98.50%	98.46%	98.38%	98.45%	98.33%
	Subtotal	117.15	111.11	188.64	174.54	117.34	111.30	188.94	174.85
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	0.77	0.77	1.41	1.41	1.13	1.13	2.01	2.01
		69.26%	68.98%	68.83%	68.59%	69.33%	69.15%	68.73%	68.57%
	Transporte	0.34	0.35	0.64	0.65	0.50	0.51	0.91	0.92
		30.74%	31.02%	31.17%	31.41%	30.67%	30.85%	31.27%	31.43%
	Subtotal	1.12	1.12	2.05	2.06	1.64	1.64	2.92	2.93
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Material	2.47	2.47	4.60	4.60	3.92	3.92	6.91	6.91
	Transporte	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Subtotal	2.47	2.47	4.60	4.60	3.92	3.92	6.91	6.91
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	200.76	195.00	341.79	328.18	239.13	233.37	405.39	391.77
	Producción hasta después del tiempo de vida	203.23	197.47	346.40	332.78	243.05	237.29	412.29	398.68

Para la etapa de **proceso constructivo** también se mantienen aproximadamente las mismas proporciones por proceso para cada escenario, siendo el proceso con mayor proporción de emisiones de materia particulada la **construcción e instalación** yendo de 79.8 a 81.1%.

De la misma manera y como en todas las tablas anteriores, en la etapa de **uso** el proceso que representa las mayores emisiones de PM_{2.5} durante dicha etapa es el



uso de energía para el funcionamiento de las viviendas con más del 98% para cada uno de los escenarios presentados.

En la última etapa del ciclo de vida; **fin de vida** de los materiales, las proporciones van de un 68.6 a 69.3% de las emisiones que corresponden al proceso de **desmantelamiento-demolición**.

Tabla 13. Potencial de smog expresado como O_3 eq, durante el ciclo de vida de las viviendas.

ETAPA	Subetapa	Potencial de smog (kg O ₃ eq)							
		1L-47CR-5.5MW	1L-47GR-5.2MW	1L-98CR-9MW	1L-98GR-8.3MW	2L-47CR-5.5MW	2L-47GR-5.2MW	2L-98CR-9MW	2L-98GR-8.3MW
PRODUCCIÓN	Manufactura	1755.95	1760.60	3206.14	3214.31	2506.84	2511.49	4463.42	4471.59
		87.03%	87.02%	86.34%	86.34%	87.94%	87.93%	87.00%	87.00%
	Transporte	261.72	262.68	507.06	508.60	343.83	344.79	666.89	668.43
		12.97%	12.98%	13.66%	13.66%	12.06%	12.07%	13.00%	13.00%
	Subtotal	2017.67	2023.28	3713.19	3722.91	2850.66	2856.28	5130.30	5140.02
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	341.43	345.79	643.22	650.26	505.47	509.84	927.27	934.31
		41.55%	41.31%	42.67%	42.44%	40.38%	40.23%	41.77%	41.62%
	Transporte	480.33	491.26	864.11	881.99	746.46	757.38	1292.69	1310.57
		58.45%	58.69%	57.33%	57.56%	59.62%	59.77%	58.23%	58.38%
	Subtotal	821.76	837.05	1507.33	1532.25	1251.93	1267.23	2219.96	2244.88
USO	Reemplazo	91.62	91.62	187.50	187.50	102.50	102.50	205.61	205.61
		1.31%	1.37%	1.79%	1.92%	1.47%	1.53%	1.96%	2.10%
	Transporte por reemplazo	26.00	26.00	50.87	50.87	27.94	27.94	53.98	53.98
		0.37%	0.39%	0.49%	0.52%	0.40%	0.42%	0.52%	0.55%
	Uso de energía de operación	6862.50	6574.82	10218.74	9547.49	6862.50	6574.82	10218.74	9547.49
		98.31%	98.24%	97.72%	97.56%	98.13%	98.05%	97.52%	97.35%
	Subtotal	6980.12	6692.44	10457.12	9785.87	6992.94	6705.26	10478.33	9807.09
FIN DE VIDA	Desmantelamiento -demolición	431.91	431.91	834.91	834.91	563.12	563.12	1088.54	1088.54
		68.50%	68.23%	69.26%	69.02%	65.99%	65.79%	67.29%	67.12%
	Transporte	198.58	201.12	370.63	374.75	290.25	292.80	529.09	533.20
		31.50%	31.77%	30.74%	30.98%	34.01%	34.21%	32.71%	32.88%
	Subtotal	630.49	633.03	1205.54	1209.65	853.38	855.93	1617.64	1621.75
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	56.95	56.95	106.13	106.13	90.43	90.43	159.21	159.21
	Transporte	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Subtotal	56.95	56.95	106.13	106.13	90.43	90.43	159.21	159.21
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	10450.03	10185.81	16883.18	16250.68	11948.91	11684.69	19446.24	18813.73
	Producción hasta después del tiempo de vida	10506.98	10242.77	16989.31	16356.80	12039.34	11775.12	19605.44	18972.94

A pesar de estas relaciones entre proceso y etapa, es importante mencionar que en términos de **efectos totales** a lo largo del ciclo de vida de las edificaciones, el



proceso que mayor impacto representa respecto a las emisiones de $PM_{2.5}$ es el **uso de energía** eléctrica durante los 40 años abarcando porcentajes de que van de 43.9 a 57.6%, siendo siempre las viviendas con techo verde las que menos emisiones generan. Lo segundo que muestra una proporción importante en cuanto a estas emisiones, son en su conjunto los procesos de manufactura, construcción-instalación, reemplazo y desmantelamiento-demolición, abarcando de 41.7 a 55.0%, registrándose las mayores proporciones en las casas con una extensión de techo más amplio y/o en las que tienen dos niveles, lo que conlleva al uso de mayor cantidad de materiales.

Las mayores emisiones de smog en la etapa de **producción** están representadas por **manufactura** abarcando del 86.3 al 87.9% del total de las emisiones en dicha etapa para cada uno de los ocho escenarios.

Durante la etapa del **proceso constructivo** el proceso de **construcción e instalación** muestra proporciones de 40.2 hasta 42.7%.

Asimismo en la etapa de **uso** las mayores emisiones se dan por el **uso de la energía** eléctrica para la operación de las viviendas a lo largo de 40 años, siendo arriba del 97% en cada caso.

Para el **fin de vida** de los materiales de las edificaciones, el **desmantelamiento-demolición** representa proporciones que van de 65.8 a 69.3%.

En términos de **efectos totales** a lo largo de 40 años del ciclo de vida, el proceso que representa las mayores emisiones de smog es el **uso de energía operacional** con porcentajes de 50.8 a 65.7%. Sin embargo, estas son las proporciones respecto a las emisiones totales de smog ya que visualizando como tal los kilogramos de O_3 , se tienen mayores emisiones en los escenarios 3-4 y 7-8 que son las viviendas con mayor extensión (casi el doble que el de las otras). El segundo lugar en emisiones es en su conjunto los procesos de manufactura, construcción-instalación, reemplazo y desmantelamiento-demolición, abarcando



del 25.1 al 35.6%, los mayores incrementos son en los escenarios con mayor extensión de techo y/o las viviendas con dos niveles.

5.2. Análisis de sensibilidad paramétrica

Los parámetros más importantes son el consumo de energía eléctrica a lo largo de 40 años de vida de los edificios y la extensión superficial de los techos (con o sin techo verde).

Lo que concierne a la energía eléctrica requerida en la etapa de uso de las edificaciones, las variaciones en los impactos ambientales potenciales se ven influenciados por la extensión de los techos (47 ó 98 m²) y por el empleo o no de un techo verde. Donde la edificación con una superficie de techo verde de 47 m² que cuenta con tres aires acondicionados presenta menores emisiones al ambiente (CO₂, SO₂, PM_{2.5}, N, O₃) que las edificaciones con una extensión de techo gris de 98 m² en donde se emplea un aire acondicionado.

En términos generales, es decir, considerando todo del ciclo de vida (40 años), las edificaciones que presentan un mayor impacto ambiental potencial son las de dos niveles, que tiene una superficie de techo de 98 m² y cuentan con tres aires acondicionados. Esto debido no sólo a los requerimientos de energía eléctrica, sino además debido a la cantidad de materiales necesarios para la edificación. Sin embargo, es importante mencionar que el escenario de una edificación de dos niveles con una extensión de techo verde de 47 m² y un consumo anual de electricidad de 8.6MW que emplea tres equipos de acondicionamiento de aire (2L-47GR-8.6MW) presenta impactos potenciales ligeramente menores que los registrados para una edificación de un nivel con una superficie de techo convencional de 98 m² y un consumo anual de electricidad de 9MW en donde se emplea un equipo de acondicionado de aire (1L-98CR-9MW). En la Tabla 14 se muestran los impactos ambientales potenciales considerándolos como efectos totales.



Tabla 14. Impactos ambientales potenciales en términos generales del LCA de los materiales de los veinticuatro escenarios.

Escenarios			Potenciales de impacto ambiental considerados como efectos totales (LCA)				
Extensión de techo (m ²)	Tipo de techado	Consumo eléctrico anual (MW)	Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)
47	Convencional	1L-5.5	240076.3	1579.8	200.8	32.3	10450.0
		1L-7	283385.9	1936.2	231.0	36.1	11888.4
		1L-10	370005.2	2649.1	291.4	43.8	14765.2
		2L-5.5	257286.6	1668.9	239.1	35.8	11948.9
		2L-7	300596.3	2025.4	269.3	39.6	13387.3
		2L-10	387215.6	2738.2	329.7	47.3	16264.1
	Verde	1L-5.2	231607.8	1511.3	195.0	31.6	10185.8
		1L-6.4	266255.5	1796.4	219.2	34.6	11336.5
		1L-8.6	329776.4	2319.2	263.5	40.3	13446.2
		2L-5.2	248818.2	1600.4	233.4	35.1	11684.7
		2L-6.4	283465.9	1885.6	257.5	38.1	12835.4
		2L-8.6	346986.7	2408.3	301.8	43.8	14945.0
98	Convencional	1L-9	375043.9	2594.6	341.8	53.8	16883.2
		1L-12	461663.2	3307.4	402.2	61.5	19760.0
		1L-17	606028.7	4495.6	502.9	74.3	24554.6
		2L-9	403985.3	2746.7	405.4	59.7	19446.2
		2L-12	490604.6	3459.6	465.8	67.4	22323.0
		2L-17	634970.1	4647.7	566.5	80.3	27117.6
	Verde	1L-8.3	355164.8	2433.0	328.2	52.1	16250.7
		1L-10.8	427347.6	3027.1	378.5	58.5	18648.0
		1L-14.3	528403.4	3858.7	449.0	67.5	22004.2
		2L-8.3	384106.2	2585.2	391.8	58.0	18813.7
		2L-10.8	456289.0	3179.2	442.1	64.4	21211.0
		2L-14.3	557344.8	4010.9	512.6	73.4	24567.3



6. DISCUSIÓN

En este capítulo se comparan los resultados de esta investigación con trabajos previos directamente relacionados al LCA de edificaciones urbanas con sistema de techado verde.

Con base en los resultados del inventario de ciclo de vida (LCI) de los materiales de las viviendas, un techo verde extensivo sobre pequeñas edificaciones urbanas genera menos impactos negativos al ambiente. De manera general en el LCI obtenido por el software *ATHENA Impact Estimator for Buildings*, se identifica que de todas la categorías de impacto; **el potencial de calentamiento global, el potencial de acidificación, las emisiones de materia particulada, el potencial de smog y el consumo de combustible fósil**, son las que mayores reducciones muestran por el uso de un techo verde en lugar de un techo convencional, principalmente en la etapa de *uso*, en la cual se registran también las mayores emisiones durante todo el ciclo de vida (para todos los escenarios más del 50%). De manera general y considerando los ocho escenarios generales con todas la combinaciones de consumos de energía durante la operación de las viviendas (veinticuatro escenarios en total), se registran ahorros de combustible fósil que van de un 3.5 a 13.2%. Asimismo, se reportan reducciones en todas las categorías de impacto yendo de un 2 a 14.2%, en todo el ciclo de vida. Saiz *et al.* (2006) reportan que de manera general que por el uso de un techo verde, los impactos ambientales se reducen entre un 1 y 5.3%, registrándose las mayores reducciones en la etapa de uso, principalmente en agotamiento abiótico y eutrofización, el potencial de calentamiento global se reduce en 1%. Ellos



registraron los mayores impactos ambientales durante la etapa de uso con más del 50%.

De acuerdo a los datos del inventario de ciclo de vida al sustituir un techo convencional por uno verde, las emisiones adicionales al ambiente causadas por los procesos de manufactura, construcción y transporte de los materiales extra de un techo verde varían de acuerdo a la superficie de éste (47 y 98 m²) y los tiempos de compensación están relacionados con los ahorros de combustible fósil empleados para la generación de energía eléctrica. En viviendas con una superficie de 47m², el CO₂ es compensado de 0.2 a 0.9 años, el SO₂ de 1.5 a 0.3 años, las PM_{2.5} de 1.8 a 0.4 años, los N y O₃ de 2.9 a 0.6 años. Para las viviendas con una superficie de 98m², el CO₂ de 0.6 a 0.2 años, el SO₂ de 0.3 a 1.1 años, las PM_{2.5} de 1.3 a 0.3 años, los N y O₃ de 2.1 a 0.5 años. De acuerdo a Getter *et al.* (2009), se necesita de 9 años para compensar las emisiones de CO₂ derivadas del proceso de manufactura de los materiales extra del techo verde a través de la captura de carbono por las plantas. Encontraron que el amplio sistema de techo verde absorbe 375 g carbón/m². Kosareo *et al.* (2007), al comparar las emisiones de NO_x y SO_x por la generación de electricidad a partir de carbón y producción de gas natural, entre un techo control, un techo verde extensivo y un techo verde intensivo reportan para la generación de electricidad; 75, 66 y 30% de las emisiones de NO_x, respectivamente; asimismo, las emisiones de SO_x son del 50% en los dos primeros tipos de techo y para el tercero es de un 20%. De la misma forma, las emisiones de SO_x generadas por la producción de gas natural van por encima del 25, poco más del 33 y 50%, respectivamente. De manera general, mencionan que la energía generada a partir de carbón, representa arriba del 50% de la carga ambiental para el techo control y techo verde extensivo y menos del 25% para el techo verde intensivo. Bianchini *et al.* (2012) reportan emisiones de CO₂ por la manufactura de cada kilogramo de polímeros de baja densidad y polietileno con dos diferentes densidades (reciclado y no reciclado). De acuerdo a los autores, los contaminantes liberados al aire por el proceso de producción son compensados después de algunos años de uso del techo verde, en general este balance se logra en dos tercios y un tercio del tiempo de vida de los techos verdes.



usando materiales no-reciclados y reciclados, respectivamente. Hong *et al.* (2012), analizaron las reducciones de emisiones de CO₂ planteando diferentes escenarios con techos verdes, fijando la absorción de las plantas en 5.0 kg/m²/año.

De acuerdo a los resultados de la simulación de energía (etapa de uso) realizada con los datos de este estudio para las viviendas con una superficie de techo de 47 y 98 m² se registraron ahorros anuales de energía del 5.4 al 14% y de 7.8 a 16%, respectivamente, de acuerdo a los escenarios de energía establecidos (Fuentes Velasco, 2014). Los ahorros económicos anuales resultantes por el empleo de techos verdes, de acuerdo a las tarifas regionales de energía eléctrica, fluctúan entre 9.5% y 19.6%. Valores similares fueron reportados por Saiz *et al.* (2006) en donde los ahorros anuales de energía (usada para enfriar o calentar) en los pisos superiores del edificio de 8 niveles con una superficie de techo de 667m², son de hasta un 25%. Asimismo, Roche *et al.* (2014) al comparar sistemas de techos en EUA (entre ellos un techo verde), establecidos en Estados con diferente tipo de clima, reportan ahorros anuales de energía del 9.1%, 8.9% y 2.1% en Phoenix, Los Ángeles y Chicago, respectivamente. Susca *et al.* (2011) reportan que al sustituir un techo blanco por un techo verde se obtienen ahorros de energía que van de un 40 a un 110%. Sailor (2008) integró un balance de energía en *EnergyPlus* para techos verdes, donde los resultados de la simulación demostraron ahorros de energía del 2% y del 9 al 11% para electricidad y gas natural, respectivamente. Basados en el modelo de Sailor, Getter *et al.* (2009) reportan ahorros mínimos anuales de 27.2 GJ de electricidad y 9.5GJ de gas natural por el uso de un techo verde. Hong *et al.* (2012) compararon el ahorro de energía debido al uso de techo verde en diferentes lugares, añadiendo además medidas de ahorro de energía durante la operación de los edificios, obteniendo con ello que los mayores ahorros energéticos fueron por los sistemas de calefacción, donde la diferencia de los ahorros máximos y mínimos (por todos los escenarios planteados) fueron de 50000 kWh en Cheolwon y cerca de 1000 kWh en Jeju. Esta diferencia de ahorro la relacionan con el tipo de clima en cada región.



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones del análisis de ciclo de vida para los escenarios considerados en este estudio.

7.1. Conclusiones

En este estudio se comparó el desempeño de un techo verde y un techo convencional sobre pequeñas edificaciones urbanas en clima tropical húmedo a partir del análisis del ciclo de vida y desde el enfoque de la sustentabilidad energética.

Un techo verde extensivo sobre pequeñas edificaciones urbanas a lo largo de su ciclo de vida genera menos impactos negativos al ambiente y proporciona mejores beneficios que un techo convencional, por lo que al emplearse en nuestro Estado contribuiría a la sustentabilidad energética.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el empleo de un techo verde impide los flujos de calor excesivos al interior de las edificaciones, logrando con ello minimizar el uso de energía derivada del empleo de equipos de acondicionamiento de aire para el enfriamiento de los espacios.

Con respecto a los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida (40 años) de los materiales de las viviendas, si bien es cierto que los materiales inertes de los techos verdes generan emisiones y gastos de combustible para su fabricación,



estos impactos son puntuales, además que de acuerdo al inventario de ciclo de vida, más del 50% de los impactos se registran durante la etapa de *uso* de las viviendas, en donde en esta etapa y a lo largo del ciclo de vida, el proceso que mayor impacto representa es el uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica. Es en esta etapa (uso) donde los impactos ambientales extra derivados de la manufactura de las capas de techo verde (etapa de producción), son contrarrestados al producirse ahorros de energía eléctrica, conllevando a menos emisiones contaminantes al ambiente que van desde 2.0 hasta 14.2% en todo el ciclo de vida.

Conforme a los resultados obtenidos en este estudio, un techo verde sobre pequeñas edificaciones urbanas a lo largo de su ciclo de vida, proporciona mejores y mayores beneficios ambientales y contribuye a la sustentabilidad energética del estado, respecto a un techo convencional.

7.2. Recomendaciones

- Es necesario complementar este estudio con un análisis costo-beneficio para poder determinar el período de tiempo necesario para recuperar la inversión extra por la construcción de un techo verde.
- Es importante considerar el empleo de un sustrato conformado con materiales locales, es decir, no importados. Con los que se disminuirían los impactos ambientales.
- Este trabajo se realizó empleando información de una unidad experimental, por lo que es deseable determinar el desempeño térmico de un techo verde extensivo a escala real.



8. REFERENCIAS

Bianchini F, Hewage K. **2012**. How “green” are the green roofs? Life cycle analysis of green roof materials, *Building and Environment*, 48: 57–65.

Canul Gómez, WA. **2014**. *Efecto de las Condiciones Ambientales Sobre el Establecimiento y Crecimiento de Especies Nativas en un Techo Verde*. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, México.

Carter T, Fowler L. **2008**. Establishing Green Roof Infrastructure through Environmental Policy Instruments. *Environmental Management*, 42: 151–164.

Carter T, Keeler A. **2008**. Life-cycle cost–benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management*, 87: 350–363.

Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) **2010**. Código de edificación de vivienda 2010. Gobierno Federal de los Estados Unidos Mexicanos. Consejo Asesor del código de edificación de vivienda (CACEV), Ciudad de México.

Fuentes-Velasco, M. **2014**. *Estimación de Ahorro Energético Asociado a la Instalación de un Techo Verde para el Aislamiento Térmico de un Edificio bajo Condiciones de Clima Tropical Húmedo*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.

Balance Nacional de Energía y su Relación con el Inventario Nacional de Emisiones 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Administración de Información de Energía de los Estados Unidos (*EIA* por sus siglas en inglés, *United States Energy Information Administration*).

Getter K, Bradleyrowe D, Philipprobertson G, Cregg B, Andresen J. **2009**. Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs. *Environmental Science and Technology*, 43: 7564–7570.



Guinée, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S. **2002**. *Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards*, Kluwer Academic Publishers, New York, USA.

Hong T, Kim J, Koo C. **2012**. LCC and LCCO₂ analysis of green roofs in elementary schools with energy saving measures, *Energy and Buildings*, 45: 229–239.

ISO 14040. **2006**. *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*, International Organisation for Standardisation (ISO), Geneve.

Jim CY, Hongming H. **2010**. Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem. *Ecological Engineering*, 36: 1052–1063.

Jim CY, Tsang SW. **2011**. Energetics of tropical intensive green roof. *Energy and Buildings*, 43: 2696–2704.

Kosareo L, Ries R. **2007**. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*, 42: 2606–2613.

Lundholm JT, Peck SW. **2008**. Introduction: Frontiers of green roof ecology. *Urban Ecosystems* 11: 335–337.

Martens R, Bass B, Saiz-Alcazar S. **2008**. Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance. *Urban Ecosystems* 11: 399–408.

Memon FA, Zheng Z, Butler D, Smith CS, S. Lui, Makropoulos C, Avery L. **2007**. Life Cycle Impact Assessment of Greywater Recycling Technologies for New Developments, *Environmental Monitoring and Assessment*, 129: 27–35.

Myrans K. **2009**. *Comparative energy and carbon assessment of three green technologies for a Toronto roof*, Master of Science Thesis, University of Toronto.

Oberndorfer E, Lundholm j, Bass B, Coffman R, Doshi H, Dunnett N, Gaffin S, Köhler M, Karen KY, LIU, Rowe B. **2007**. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services, *BioScience*, 57(10): 823-833.

OECD, **2007**. Contribution to the United Nations Commission on Sustainable Development 15. *Energy for Sustainable Development*.



OECD. **2010**. Interim Report of the Green Growth Strategy: Implementing our commitment for a sustainable future. *Meeting of the OECD Council at Ministerial Level*, 27–28.

Peri G, Traverso M, Finkbeiner M, Rizzo G. **2012**. The cost of green roofs disposal in a life cycle perspective: Covering the gap. *Energy*, 48: 406–414.

Prindle B, Eldridge M, Eckhardt M, Frederick A, Council A, Energy R. **2007**. *The Twin Pillars of Sustainable Energy: Synergies between Energy Efficiency and Renewable Energy Technology and Policy*. American Council for an Energy-Efficient Economy, Report Number E074, May.

Roche P, Berardi U. **2014**. Comfort and energy savings with active green roofs. *Energy and Buildings*, 82: 492-504.

Sailor DJ. **2008**. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40: 1466–1478.

Saiz, S. Kennedy C, Bass B, Pressnail K. **2006**. Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs, *Environmental Science and Technology*, 40: 4312–4316.

Secretaría de Energía (SENER). **2009**. *Prospectiva del mercado de Gas LP 2009-2024*. Gobierno Federal de los Estados Unidos Mexicanos. Dirección General de Planeación Energética de la Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico de SENER, Ciudad de México.

Spala A, Bagiorgas HS, Assimakopoulos MN, Kalavrouziotis J, Matthopoulos D, Mihalakakou G. **2008**. On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. *Renewable Energy*, 33: 173–177.

Susca T, Gaffin SR, Dell’Osso GR. **2011**. Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 159: 2119–2126.

Susca T. **2012**. Enhancement of life cycle assessment (LCA) methodology to include the effect of surface albedo on climate change: Comparing black and white roofs. *Environmental Pollution*, 163: 48–54.

US-DOE. **2010**. The United States Department of Energy, *Energy Plus v7.0, Building Energy Simulation Software, User’s Guide*.



US-EPA, **2007**. The United States Environmental Protection Agency, *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*, recurso electrónico: <http://www.epa.gov/nrmrl/std/traci/traci.html>.

Whatley MB. **2011**. *Life-cycle cost-benefit analysis of green roofing systems: the economic and environmental impact of installing green roofs on all Atlanta public schools*, Master of Sciences Thesis, Georgia Institute of Technology.

Wong NH, Tay SF, Wong R, Ong CL, Sia A. **2003**. Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. *Building and Environment*, 38: 499–509.

Zhanga X, Shena L, Vivian WY, Leea WWY. **2012**. Barriers to implement extensive green roof systems: A Hong Kong study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 314– 319.

Zinzi M, Agnoli S. **2012**. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 55: 66–76.



Anexo A

Tablas de resumen de potenciales de impacto y consumo de combustible fósil de todos los escenarios por etapas del LCA.



Tabla A.1. Resumen del consumo de combustible fósil e impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida de una vivienda de un nivel y una superficie de techo de 47 m² y con diferentes consumos de energía eléctrica.

ETAPA	Subetapa	Potenciales de impacto						Potenciales de impacto					
		Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)	Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)
		1L-47CR-7MW						1L-47GR-6.4MW					
PRODUCCIÓN	Manufactura	32692.4	150.3	78.0	3.8	1755.9	313846.1	32830.1	152.5	78.2	3.8	1760.6	319770.9
	Transporte	795.0	7.5	0.4	0.5	261.7	10605.9	798.1	7.6	0.4	0.5	262.7	10643.6
	Subtotal	33487.4	157.8	78.4	4.3	2017.7	324452.0	33628.2	160.0	78.6	4.3	2023.3	330414.5
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	2229.0	13.9	3.3	0.6	341.4	23038.9	2240.7	14.1	3.3	0.6	345.8	23289.3
	Transporte	1432.1	13.8	0.8	0.9	480.3	19107.0	1465.0	14.1	0.8	1.0	491.3	19549.4
	Subtotal	3661.1	27.7	4.1	1.6	821.8	42145.9	3705.7	28.2	4.1	1.6	837.1	42838.7
USO	Reemplazo	1239.1	8.7	1.6	6.3	91.6	45799.1	1239.1	8.7	1.6	6.3	91.6	45799.1
	Transporte por reemplazo	72.2	0.7	0.0	0.1	26.0	972.4	72.2	0.7	0.0	0.1	26.0	972.4
	Uso de energía de operación	243236.4	1722.5	145.7	22.7	8300.9	3703842.9	225912.5	1580.0	133.7	21.2	7725.5	3438111.4
	Subtotal	244547.7	1732.0	147.4	29.1	8418.5	3750614.3	227223.9	1589.4	135.3	27.5	7843.2	3484882.8
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	1055.8	13.0	0.8	0.8	431.9	15767.4	1055.8	13.0	0.8	0.8	431.9	15767.4
	Transporte	633.9	5.7	0.3	0.4	198.6	7715.4	642.0	5.8	0.3	0.4	201.1	7814.3
	Subtotal	1689.7	18.7	1.1	1.2	630.5	23482.7	1697.8	18.8	1.1	1.2	633.0	23581.7
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	2451.3	5.6	2.5	0.3	57.0	22624.0	2451.3	5.6	2.5	0.3	57.0	22624.0
	Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Subtotal	2451.3	5.6	2.5	0.3	57.0	22624.0	2451.3	5.6	2.5	0.3	57.0	22624.0
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	283385.9	1936.2	231.0	36.1	11888.4	4140695.0	266255.5	1796.4	219.2	34.6	11336.5	3881717.8
	Producción hasta después del tiempo de vida	285837.3	1941.9	233.4	36.4	11945.4	4163319.0	268706.9	1802.1	221.6	34.9	11393.5	3904341.8



ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO

ETAPA	Subetapa	Potenciales de impacto						Potenciales de impacto					
		Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)	Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)
		1L-47CR-10MW						1L-47GR-8.6MW					
PRODUCCIÓN	Manufactura	32692.4	150.3	78.0	3.8	1755.9	313846.1	32830.1	152.5	78.2	3.8	1760.6	319770.9
	Transporte	795.0	7.5	0.4	0.5	261.7	10605.9	798.1	7.6	0.4	0.5	262.7	10643.6
	Subtotal	33487.4	157.8	78.4	4.3	2017.7	324452.0	33628.2	160.0	78.6	4.3	2023.3	330414.5
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	2229.0	13.9	3.3	0.6	341.4	23038.9	2240.7	14.1	3.3	0.6	345.8	23289.3
	Transporte	1432.1	13.8	0.8	0.9	480.3	19107.0	1465.0	14.1	0.8	1.0	491.3	19549.4
	Subtotal	3661.1	27.7	4.1	1.6	821.8	42145.9	3705.7	28.2	4.1	1.6	837.1	42838.7
USO	Reemplazo	1239.1	8.7	1.6	6.3	91.6	45799.1	1239.1	8.7	1.6	6.3	91.6	45799.1
	Transporte por reemplazo	72.2	0.7	0.0	0.1	26.0	972.4	72.2	0.7	0.0	0.1	26.0	972.4
	Uso de energía de operación	329855.7	2435.4	206.2	30.4	11177.7	5032500.5	289433.3	2102.7	178.0	26.8	9835.2	4412460.3
	Subtotal	331167.0	2444.8	207.8	36.8	11295.3	5079272.0	290744.7	2112.1	179.6	33.2	9952.8	4459231.7
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	1055.8	13.0	0.8	0.8	431.9	15767.4	1055.8	13.0	0.8	0.8	431.9	15767.4
	Transporte	633.9	5.7	0.3	0.4	198.6	7715.4	642.0	5.8	0.3	0.4	201.1	7814.3
	Subtotal	1689.7	18.7	1.1	1.2	630.5	23482.7	1697.8	18.8	1.1	1.2	633.0	23581.7
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	2451.3	5.6	2.5	0.3	57.0	22624.0	2451.3	5.6	2.5	0.3	57.0	22624.0
	Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Subtotal	2451.3	5.6	2.5	0.3	57.0	22624.0	2451.3	5.6	2.5	0.3	57.0	22624.0
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	370005.2	2649.1	291.4	43.8	14765.2	5469352.6	329776.4	2319.2	263.5	40.3	13446.2	4856066.7
	Producción hasta después del tiempo de vida	372456.6	2654.7	293.8	44.1	14822.1	5491976.7	332227.7	2324.8	265.9	40.6	13503.1	4878690.7



ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO

Tabla A.2. Resumen del consumo de combustible fósil e impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida de una vivienda de un nivel y una superficie de techo de 98 m² y con diferentes consumos de energía eléctrica.

ETAPA	Subetapa	Potenciales de impacto						Potenciales de impacto					
		Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)	Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)
		1L-98CR-9MW						1L-98GR-8.3MW					
PRODUCCIÓN	Manufactura	60045.3	277.6	142.8	6.9	3206.1	582308.6	60286.5	281.5	143.2	6.9	3214.3	592727.7
	Transporte	1540.1	14.6	0.8	1.0	507.1	20537.8	1545.0	14.6	0.8	1.0	508.6	20598.3
	Subtotal	61585.4	292.2	143.6	7.8	3713.2	602846.4	61831.6	296.1	144.1	7.9	3722.9	613325.9
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	4215.9	26.1	6.1	1.2	643.2	44338.9	4235.0	26.3	6.1	1.2	650.3	44759.3
	Transporte	2582.6	24.8	1.4	1.7	864.1	34411.5	2636.4	25.4	1.4	1.7	882.0	35134.2
	Subtotal	6798.5	50.9	7.5	2.9	1507.3	78750.4	6871.4	51.7	7.5	2.9	1532.2	79893.5
USO	Reemplazo	2337.4	16.5	2.5	12.8	187.5	92932.8	2337.4	16.5	2.5	12.8	187.5	92932.8
	Transporte por reemplazo	141.4	1.5	0.1	0.1	50.9	1902.6	141.4	1.5	0.1	0.1	50.9	1902.6
	Uso de energía de operación	300982.6	2197.8	186.0	27.8	10218.7	4589614.6	280771.4	2031.5	171.9	26.0	9547.5	4279594.5
	Subtotal	303461.4	2215.8	188.6	40.7	10457.1	4684450.1	283250.2	2049.4	174.5	38.9	9785.9	4374429.9
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	2015.4	25.0	1.4	1.6	834.9	30080.9	2015.4	25.0	1.4	1.6	834.9	30080.9
	Transporte	1183.1	10.7	0.6	0.7	370.6	14400.3	1196.2	10.8	0.6	0.7	374.7	14560.0
	Subtotal	3198.5	35.7	2.1	2.3	1205.5	44481.2	3211.6	35.8	2.1	2.3	1209.7	44641.0
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	4586.1	10.5	4.6	0.5	106.1	42158.6	4586.1	10.5	4.6	0.5	106.1	42158.6
	Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Subtotal	4586.1	10.5	4.6	0.5	106.1	42158.6	4586.1	10.5	4.6	0.5	106.1	42158.6
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	375043.9	2594.6	341.8	53.8	16883.2	5410528.1	355164.8	2433.0	328.2	52.1	16250.7	5112290.3
	Producción hasta después del tiempo de vida	379629.9	2605.1	346.4	54.3	16989.3	5452686.6	359750.9	2443.5	332.8	52.6	16356.8	5154448.9



ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO

ETAPA	Subetapa	Potenciales de impacto						Potenciales de impacto					
		Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)	Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)
		1L-98CR-12MW						1L-98GR-10.8MW					
PRODUCCIÓN	Manufactura	60045.3	277.6	142.8	6.9	3206.1	582308.6	60286.5	281.5	143.2	6.9	3214.3	592727.7
	Transporte	1540.1	14.6	0.8	1.0	507.1	20537.8	1545.0	14.6	0.8	1.0	508.6	20598.3
	Subtotal	61585.4	292.2	143.6	7.8	3713.2	602846.4	61831.6	296.1	144.1	7.9	3722.9	613325.9
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	4215.9	26.1	6.1	1.2	643.2	44338.9	4235.0	26.3	6.1	1.2	650.3	44759.3
	Transporte	2582.6	24.8	1.4	1.7	864.1	34411.5	2636.4	25.4	1.4	1.7	882.0	35134.2
	Subtotal	6798.5	50.9	7.5	2.9	1507.3	78750.4	6871.4	51.7	7.5	2.9	1532.2	79893.5
USO	Reemplazo	2337.4	16.5	2.5	12.8	187.5	92932.8	2337.4	16.5	2.5	12.8	187.5	92932.8
	Transporte por reemplazo	141.4	1.5	0.1	0.1	50.9	1902.6	141.4	1.5	0.1	0.1	50.9	1902.6
	Uso de energía de operación	387601.9	2910.7	246.4	35.6	13095.5	5918272.3	352954.2	2625.5	222.3	32.5	11944.8	5386809.2
	Subtotal	390080.7	2928.6	249.0	48.5	13333.9	6013107.7	355433.0	2643.5	224.9	45.4	12183.2	5481644.6
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	2015.4	25.0	1.4	1.6	834.9	30080.9	2015.4	25.0	1.4	1.6	834.9	30080.9
	Transporte	1183.1	10.7	0.6	0.7	370.6	14400.3	1196.2	10.8	0.6	0.7	374.7	14560.0
	Subtotal	3198.5	35.7	2.1	2.3	1205.5	44481.2	3211.6	35.8	2.1	2.3	1209.7	44641.0
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	4586.1	10.5	4.6	0.5	106.1	42158.6	4586.1	10.5	4.6	0.5	106.1	42158.6
	Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Subtotal	4586.1	10.5	4.6	0.5	106.1	42158.6	4586.1	10.5	4.6	0.5	106.1	42158.6
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	461663.2	3307.4	402.2	61.5	19760.0	6739185.7	427347.6	3027.1	378.5	58.5	18648.0	6219505.0
	Producción hasta después del tiempo de vida	466249.3	3317.9	406.8	62.0	19866.1	6781344.2	431933.7	3037.6	383.1	59.0	18754.1	6261663.5



ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO

		Potenciales de impacto						Potenciales de impacto					
		Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)	Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)
		1L98CR-17MW						1L-98GR-14.3MW					
ETAPA	Subetapa												
PRODUCCIÓN	Manufactura	60045.3	277.6	142.8	6.9	3206.1	582308.6	60286.5	281.5	143.2	6.9	3214.3	592727.7
	Transporte	1540.1	14.6	0.8	1.0	507.1	20537.8	1545.0	14.6	0.8	1.0	508.6	20598.3
	Subtotal	61585.4	292.2	143.6	7.8	3713.2	602846.4	61831.6	296.1	144.1	7.9	3722.9	613325.9
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	4215.9	26.1	6.1	1.2	643.2	44338.9	4235.0	26.3	6.1	1.2	650.3	44759.3
	Transporte	2582.6	24.8	1.4	1.7	864.1	34411.5	2636.4	25.4	1.4	1.7	882.0	35134.2
	Subtotal	6798.5	50.9	7.5	2.9	1507.3	78750.4	6871.4	51.7	7.5	2.9	1532.2	79893.5
USO	Reemplazo	2337.4	16.5	2.5	12.8	187.5	92932.8	2337.4	16.5	2.5	12.8	187.5	92932.8
	Transporte por reemplazo	141.4	1.5	0.1	0.1	50.9	1902.6	141.4	1.5	0.1	0.1	50.9	1902.6
	Uso de energía de operación	531967.4	4098.8	347.1	48.4	17890.1	8132701.6	454010.0	3457.2	292.7	41.5	15301.0	6936909.8
	Subtotal	534446.2	4116.7	349.7	61.3	18128.5	8227537.1	456488.8	3475.2	295.4	54.4	15539.4	7031745.2
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	2015.4	25.0	1.4	1.6	834.9	30080.9	2015.4	25.0	1.4	1.6	834.9	30080.9
	Transporte	1183.1	10.7	0.6	0.7	370.6	14400.3	1196.2	10.8	0.6	0.7	374.7	14560.0
	Subtotal	3198.5	35.7	2.1	2.3	1205.5	44481.2	3211.6	35.8	2.1	2.3	1209.7	44641.0
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	4586.1	10.5	4.6	0.5	106.1	42158.6	4586.1	10.5	4.6	0.5	106.1	42158.6
	Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Subtotal	4586.1	10.5	4.6	0.5	106.1	42158.6	4586.1	10.5	4.6	0.5	106.1	42158.6
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	606028.7	4495.6	502.9	74.3	24554.6	8953615.1	528403.4	3858.7	449.0	67.5	22004.2	7769605.5
	Producción hasta después del tiempo de vida	610614.8	4506.1	507.5	74.9	24660.7	8995773.6	532989.5	3869.3	453.6	68.0	22110.4	7811764.1



Tabla A.3. Resumen del consumo de combustible fósil e impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida de una vivienda de dos niveles y una superficie de techo de 47 m² y con diferentes consumos de energía eléctrica.

		Potenciales de impacto						Potenciales de impacto							
		Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)	Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)		
		2L-47CR-5.5MW						2L-47GR-5.2MW							
ETAPA	Subetapa														
PRODUCCIÓN	Manufactura	46906.1	213.9	113.5	5.4	2506.8	438042.6	47043.8	216.1	113.7	5.4	2511.5	443967.4		
	Transporte	1044.7	9.9	0.6	0.7	343.8	13944.2	1047.8	9.9	0.6	0.7	344.8	13982.0		
	Subtotal	47950.8	223.8	114.1	6.1	2850.7	451986.8	48091.6	226.0	114.3	6.1	2856.3	457949.3		
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	3271.0	20.4	4.9	0.9	505.5	33752.0	3282.6	20.6	4.9	0.9	509.8	34002.4		
	Transporte	2221.2	21.5	1.2	1.5	746.5	29727.4	2254.2	21.8	1.2	1.5	757.4	30169.8		
	Subtotal	5492.2	41.9	6.1	2.4	1251.9	63479.4	5536.8	42.4	6.1	2.4	1267.2	64172.2		
USO	Reemplazo	1496.0	10.8	1.8	6.8	102.5	49234.2	1496.0	10.8	1.8	6.8	102.5	49234.2		
	Transporte por reemplazo	77.6	0.8	0.0	0.1	27.9	1045.1	77.6	0.8	0.0	0.1	27.9	1045.1		
	Uso de energía de operación	199926.7	1366.1	115.5	18.8	6862.5	3039514.1	191264.8	1294.8	109.5	18.1	6574.8	2906648.3		
	Subtotal	201500.3	1377.7	117.3	25.7	6992.9	3089793.3	192838.4	1306.4	111.3	24.9	6705.3	2956927.6		
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	1416.8	17.2	1.1	1.1	563.1	21186.3	1416.8	17.2	1.1	1.1	563.1	21186.3		
	Transporte	926.5	8.4	0.5	0.6	290.3	11277.3	934.6	8.4	0.5	0.6	292.8	11376.3		
	Subtotal	2343.3	25.5	1.6	1.6	853.4	32463.6	2351.4	25.6	1.6	1.6	855.9	32562.6		
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	3897.4	9.0	3.9	0.5	90.4	35922.5	3897.4	9.0	3.9	0.5	90.4	35922.5		
	Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
	Subtotal	3897.4	9.0	3.9	0.5	90.4	35922.5	3897.4	9.0	3.9	0.5	90.4	35922.5		
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	257286.6	1668.9	239.1	35.8	11948.9	3637723.2	248818.2	1600.4	233.4	35.1	11684.7	3511611.7		
	Producción hasta después del tiempo de vida	261184.0	1677.9	243.0	36.2	12039.3	3673645.7	252715.5	1609.4	237.3	35.5	11775.1	3547534.2		



ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO

ETAPA	Subetapa	Potenciales de impacto						Potenciales de impacto					
		Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)	Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)
		2L-47CR-7MW						2L-47GR-6.4MW					
PRODUCCIÓN	Manufactura	46906.1	213.9	113.5	5.4	2506.8	438042.6	47043.8	216.1	113.7	5.4	2511.5	443967.4
	Transporte	1044.7	9.9	0.6	0.7	343.8	13944.2	1047.8	9.9	0.6	0.7	344.8	13982.0
	Subtotal	47950.8	223.8	114.1	6.1	2850.7	451986.8	48091.6	226.0	114.3	6.1	2856.3	457949.3
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	3271.0	20.4	4.9	0.9	505.5	33752.0	3282.6	20.6	4.9	0.9	509.8	34002.4
	Transporte	2221.2	21.5	1.2	1.5	746.5	29727.4	2254.2	21.8	1.2	1.5	757.4	30169.8
	Subtotal	5492.2	41.9	6.1	2.4	1251.9	63479.4	5536.8	42.4	6.1	2.4	1267.2	64172.2
USO	Reemplazo	1496.0	10.8	1.8	6.8	102.5	49234.2	1496.0	10.8	1.8	6.8	102.5	49234.2
	Transporte por reemplazo	77.6	0.8	0.0	0.1	27.9	1045.1	77.6	0.8	0.0	0.1	27.9	1045.1
	Uso de energía de operación	243236.4	1722.5	145.7	22.7	8300.9	3703842.9	225912.5	1580.0	133.7	21.2	7725.5	3438111.4
	Subtotal	244810.0	1734.2	147.5	29.5	8431.3	3754122.1	227486.1	1591.6	135.5	28.0	7856.0	3488390.6
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	1416.8	17.2	1.1	1.1	563.1	21186.3	1416.8	17.2	1.1	1.1	563.1	21186.3
	Transporte	926.5	8.4	0.5	0.6	290.3	11277.3	934.6	8.4	0.5	0.6	292.8	11376.3
	Subtotal	2343.3	25.5	1.6	1.6	853.4	32463.6	2351.4	25.6	1.6	1.6	855.9	32562.6
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	3897.4	9.0	3.9	0.5	90.4	35922.5	3897.4	9.0	3.9	0.5	90.4	35922.5
	Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Subtotal	3897.4	9.0	3.9	0.5	90.4	35922.5	3897.4	9.0	3.9	0.5	90.4	35922.5
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	300596.3	2025.4	269.3	39.6	13387.3	4302052.0	283465.9	1885.6	257.5	38.1	12835.4	4043074.8
	Producción hasta después del tiempo de vida	304493.7	2034.3	273.3	40.1	13477.7	4337974.5	287363.3	1894.5	261.5	38.6	12925.8	4078997.3



ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO

ETAPA	Subetapa	Potenciales de impacto						Potenciales de impacto					
		Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)	Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)
		2L-47CR-10MW						2L-47GR-8.6MW					
PRODUCCIÓN	Manufactura	46906.1	213.9	113.5	5.4	2506.8	438042.6	47043.8	216.1	113.7	5.4	2511.5	443967.4
	Transporte	1044.7	9.9	0.6	0.7	343.8	13944.2	1047.8	9.9	0.6	0.7	344.8	13982.0
	Subtotal	47950.8	223.8	114.1	6.1	2850.7	451986.8	48091.6	226.0	114.3	6.1	2856.3	457949.3
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	3271.0	20.4	4.9	0.9	505.5	33752.0	3282.6	20.6	4.9	0.9	509.8	34002.4
	Transporte	2221.2	21.5	1.2	1.5	746.5	29727.4	2254.2	21.8	1.2	1.5	757.4	30169.8
	Subtotal	5492.2	41.9	6.1	2.4	1251.9	63479.4	5536.8	42.4	6.1	2.4	1267.2	64172.2
USO	Reemplazo	1496.0	10.8	1.8	6.8	102.5	49234.2	1496.0	10.8	1.8	6.8	102.5	49234.2
	Transporte por reemplazo	77.6	0.8	0.0	0.1	27.9	1045.1	77.6	0.8	0.0	0.1	27.9	1045.1
	Uso de energía de operación	329855.7	2435.4	206.2	30.4	11177.7	5032500.5	289433.3	2102.7	178.0	26.8	9835.2	4412460.3
	Subtotal	331429.3	2447.0	208.0	37.2	11308.1	5082779.8	291006.9	2114.4	179.8	33.6	9965.6	4462739.5
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	1416.8	17.2	1.1	1.1	563.1	21186.3	1416.8	17.2	1.1	1.1	563.1	21186.3
	Transporte	926.5	8.4	0.5	0.6	290.3	11277.3	934.6	8.4	0.5	0.6	292.8	11376.3
	Subtotal	2343.3	25.5	1.6	1.6	853.4	32463.6	2351.4	25.6	1.6	1.6	855.9	32562.6
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	3897.4	9.0	3.9	0.5	90.4	35922.5	3897.4	9.0	3.9	0.5	90.4	35922.5
	Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Subtotal	3897.4	9.0	3.9	0.5	90.4	35922.5	3897.4	9.0	3.9	0.5	90.4	35922.5
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	387215.6	2738.2	329.7	47.3	16264.1	5630709.6	346986.7	2408.3	301.8	43.8	14945.0	5017423.7
	Producción hasta después del tiempo de vida	391113.0	2747.2	333.7	47.8	16354.5	5666632.2	350884.1	2417.3	305.8	44.3	15035.5	5053346.2



Tabla A.4. Resumen del consumo de combustible fósil e impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida de una vivienda de dos niveles y una superficie de techo de 98 m² y con diferentes consumos de energía eléctrica.

ETAPA	Subetapa	Potenciales de impacto						Potenciales de impacto					
		Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)	Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)
		2L98CR-9MW						2L-98GR-8.3MW					
PRODUCCIÓN	Manufactura	83838.8	385.5	201.7	9.6	4463.4	787484.1	84080.0	389.4	202.1	9.6	4471.6	797903.1
	Transporte	2025.6	19.2	1.1	1.3	666.9	27018.7	2030.5	19.2	1.1	1.3	668.4	27079.1
	Subtotal	85864.3	404.7	202.8	10.9	5130.3	814502.7	86110.5	408.6	203.2	10.9	5140.0	824982.3
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	5989.3	37.3	8.6	1.7	927.3	62778.1	6008.5	37.5	8.6	1.7	934.3	63198.6
	Transporte	3861.2	37.2	2.1	2.5	1292.7	51514.0	3914.9	37.7	2.1	2.6	1310.6	52236.6
	Subtotal	9850.5	74.4	10.7	4.2	2220.0	114292.1	9923.4	75.2	10.8	4.3	2244.9	115435.2
USO	Reemplazo	2768.3	20.1	2.8	13.5	205.6	98703.8	2768.3	20.1	2.8	13.5	205.6	98703.8
	Transporte por reemplazo	150.0	1.6	0.1	0.1	54.0	2019.5	150.0	1.6	0.1	0.1	54.0	2019.5
	Uso de energía de operación	300982.6	2197.8	186.0	27.8	10218.7	4589614.6	280771.4	2031.5	171.9	26.0	9547.5	4279594.5
	Subtotal	303900.9	2219.5	188.9	41.5	10478.3	4690338.0	283689.8	2053.1	174.8	39.7	9807.1	4380317.9
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	2680.6	32.9	2.0	2.1	1088.5	40045.5	2680.6	32.9	2.0	2.1	1088.5	40045.5
	Transporte	1688.9	15.2	0.9	1.0	529.1	20557.0	1702.0	15.3	0.9	1.0	533.2	20716.7
	Subtotal	4369.5	48.1	2.9	3.1	1617.6	60602.5	4382.6	48.2	2.9	3.1	1621.7	60762.2
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	6885.3	15.8	6.9	0.8	159.2	63244.6	6885.3	15.8	6.9	0.8	159.2	63244.6
	Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Subtotal	6885.3	15.8	6.9	0.8	159.2	63244.6	6885.3	15.8	6.9	0.8	159.2	63244.6
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	403985.3	2746.7	405.4	59.7	19446.2	5679735.3	384106.2	2585.2	391.8	58.0	18813.7	5381497.5
	Producción hasta después del tiempo de vida	410870.6	2762.5	412.3	60.5	19605.4	5742979.9	390991.6	2600.9	398.7	58.8	18972.9	5444742.2



ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO

ETAPA	Subetapa	Potenciales de impacto						Potenciales de impacto					
		Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)	Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)
		2L98CR-12MW						2L-98GR-10.8MW					
PRODUCCIÓN	Manufactura	83838.8	385.5	201.7	9.6	4463.4	787484.1	84080.0	389.4	202.1	9.6	4471.6	797903.1
	Transporte	2025.6	19.2	1.1	1.3	666.9	27018.7	2030.5	19.2	1.1	1.3	668.4	27079.1
	Subtotal	85864.3	404.7	202.8	10.9	5130.3	814502.7	86110.5	408.6	203.2	10.9	5140.0	824982.3
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	5989.3	37.3	8.6	1.7	927.3	62778.1	6008.5	37.5	8.6	1.7	934.3	63198.6
	Transporte	3861.2	37.2	2.1	2.5	1292.7	51514.0	3914.9	37.7	2.1	2.6	1310.6	52236.6
	Subtotal	9850.5	74.4	10.7	4.2	2220.0	114292.1	9923.4	75.2	10.8	4.3	2244.9	115435.2
USO	Reemplazo	2768.3	20.1	2.8	13.5	205.6	98703.8	2768.3	20.1	2.8	13.5	205.6	98703.8
	Transporte por reemplazo	150.0	1.6	0.1	0.1	54.0	2019.5	150.0	1.6	0.1	0.1	54.0	2019.5
	Uso de energía de operación	387601.9	2910.7	246.4	35.6	13095.5	5918272.3	352954.2	2625.5	222.3	32.5	11944.8	5386809.2
	Subtotal	390520.2	2932.3	249.4	49.2	13355.1	6018995.6	355872.5	2647.2	225.2	46.1	12204.4	5487532.6
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	2680.6	32.9	2.0	2.1	1088.5	40045.5	2680.6	32.9	2.0	2.1	1088.5	40045.5
	Transporte	1688.9	15.2	0.9	1.0	529.1	20557.0	1702.0	15.3	0.9	1.0	533.2	20716.7
	Subtotal	4369.5	48.1	2.9	3.1	1617.6	60602.5	4382.6	48.2	2.9	3.1	1621.7	60762.2
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	6885.3	15.8	6.9	0.8	159.2	63244.6	6885.3	15.8	6.9	0.8	159.2	63244.6
	Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Subtotal	6885.3	15.8	6.9	0.8	159.2	63244.6	6885.3	15.8	6.9	0.8	159.2	63244.6
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	490604.6	3459.6	465.8	67.4	22323.0	7008392.9	456289.0	3179.2	442.1	64.4	21211.0	6488712.2
	Producción hasta después del tiempo de vida	497489.9	3475.4	472.7	68.2	22482.2	7071637.6	463174.3	3195.0	449.0	65.2	21370.3	6551956.9



ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO

ETAPA	Subetapa	Potenciales de impacto						Potenciales de impacto					
		Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)	Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)	Consumo de combustible fósil (MJ)
		2L98CR-17MW						2L-98GR-14.3MW					
PRODUCCIÓN	Manufactura	83838.8	385.5	201.7	9.6	4463.4	787484.1	84080.0	389.4	202.1	9.6	4471.6	797903.1
	Transporte	2025.6	19.2	1.1	1.3	666.9	27018.7	2030.5	19.2	1.1	1.3	668.4	27079.1
	Subtotal	85864.3	404.7	202.8	10.9	5130.3	814502.7	86110.5	408.6	203.2	10.9	5140.0	824982.3
PROCESO CONSTRUCTIVO	Construcción e instalación	5989.3	37.3	8.6	1.7	927.3	62778.1	6008.5	37.5	8.6	1.7	934.3	63198.6
	Transporte	3861.2	37.2	2.1	2.5	1292.7	51514.0	3914.9	37.7	2.1	2.6	1310.6	52236.6
	Subtotal	9850.5	74.4	10.7	4.2	2220.0	114292.1	9923.4	75.2	10.8	4.3	2244.9	115435.2
USO	Reemplazo	2768.3	20.1	2.8	13.5	205.6	98703.8	2768.3	20.1	2.8	13.5	205.6	98703.8
	Transporte por reemplazo	150.0	1.6	0.1	0.1	54.0	2019.5	150.0	1.6	0.1	0.1	54.0	2019.5
	Uso de energía de operación	531967.4	4098.8	347.1	48.4	17890.1	8132701.6	454010.0	3457.2	292.7	41.5	15301.0	6936909.8
	Subtotal	534885.8	4120.4	350.0	62.1	18149.7	8233425.0	456928.4	3478.9	295.7	55.1	15560.6	7037633.1
FIN DE VIDA	Desmantelamiento-demolición	2680.6	32.9	2.0	2.1	1088.5	40045.5	2680.6	32.9	2.0	2.1	1088.5	40045.5
	Transporte	1688.9	15.2	0.9	1.0	529.1	20557.0	1702.0	15.3	0.9	1.0	533.2	20716.7
	Subtotal	4369.5	48.1	2.9	3.1	1617.6	60602.5	4382.6	48.2	2.9	3.1	1621.7	60762.2
DESPUÉS DEL TIEMPO DE VIDA DEL EDIFICIO	Materiales	6885.3	15.8	6.9	0.8	159.2	63244.6	6885.3	15.8	6.9	0.8	159.2	63244.6
	Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Subtotal	6885.3	15.8	6.9	0.8	159.2	63244.6	6885.3	15.8	6.9	0.8	159.2	63244.6
EFECTOS TOTALES	Producción hasta Fin de vida	634970.1	4647.7	566.5	80.3	27117.6	9222822.3	557344.8	4010.9	512.6	73.4	24567.3	8038812.8
	Producción hasta después del tiempo de vida	641855.4	4663.5	573.4	81.1	27276.8	9286067.0	564230.2	4026.7	519.5	74.2	24726.5	8102057.4



Anexo B

Uso de recursos (materias primas) y fuentes de consumo de energía por componente de construcción de las edificaciones.



Tabla B 1. Listado de los recursos (materias primas) requeridos para cada componente de construcción de las viviendas de uno y dos niveles con una superficie de techo de 47 m².

Materiales en común de viviendas con CR y GR										Incrementos por materiales exclusivos GR
1L-47 m ²										
Materiales	Cimientos	Paredes	Columnas y vigas	Techos	Pisos	Materiales extra	Total (kg)	Materiales extra	Total (kg)	Δ Materiales extra
Cenizas (kg)	36.7	12.4	32.0	32.0	41.0	2.4	156.5	2.4	156.5	2.2E-06
Dióxido de carbono en aire (kg)	2.6	105.3	44.7	11.4	14.5	0.0	178.5	0.0	178.5	0.0E+00
Arcilla y esquistos (kg)	1660.3	560.6	1443.9	1448.0	1851.9	75.4	7040.2	75.5	7040.2	3.9E-03
Carbón (kg)	1167.9	1399.8	2106.5	1343.0	1602.1	36.1	7655.4	50.6	7669.8	1.4E+01
Agregado de construcción (kg)	14947.0	98.5	12999.5	13036.2	16671.8	636.6	58389.6	1869.6	59622.6	1.2E+03
Aceite crudo (L)	415.7	1022.5	462.3	542.9	534.9	158.3	3136.5	178.3	3156.5	2.0E+01
Petroleo crudo como materia prima (L)	0.0	8.2	0.0	1419.0	0.0	82.9	1510.1	113.8	1541.0	3.1E+01
Dolomita (kg)	10.3	68.5	178.9	45.5	58.2	0.0	361.4	0.0	361.4	0.0E+00
Desechos de hierro (kg)	152.8	855.9	2651.9	674.3	862.4	0.0	5197.4	0.0	5197.4	0.0E+00
Agregado fino (kg)	9713.0	4574.7	8447.5	8471.3	10833.9	1501.9	43542.3	1501.9	43542.3	0.0E+00
Yeso (natural) (kg)	258.0	87.1	224.4	225.0	287.8	0.0	1082.4	0.0	1082.4	0.0E+00
Yeso sintético (kg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0E+00
Mineral de hierro (kg)	114.3	307.6	1378.6	374.5	478.9	7.1	2660.9	7.1	2660.9	2.9E-03
Lignito (kg)	-0.4	21.0	-7.2	-1.8	-2.4	0.0	9.1	0.0	9.1	0.0E+00
Caliza (kg)	5997.2	2048.6	5228.7	5378.5	6692.8	275.9	25621.6	275.9	25621.6	1.9E-03
Gas natural (m3)	336.2	784.0	505.3	664.2	432.8	89.8	2812.3	122.6	2845.0	3.3E+01
Gas natural como materia prima (m3)	0.0	5.5	0.0	85.9	0.0	8.7	100.2	89.6	181.1	8.1E+01
Otro (kg)	0.0	110.8	0.0	0.0	0.0	0.0	110.8	0.1	110.9	5.1E-02
Arena (kg)	73.0	56.8	63.5	63.6	81.4	0.0	338.3	0.0	338.3	1.9E-05
Semi-cementoso de materiales (kg)	880.7	0.0	766.0	768.1	982.3	0.0	3397.1	0.0	3397.1	0.0E+00
Mineral de estaño (kg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0E+00
Uranio (kg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4E-04
Agua (L)	4422.1	18807.9	47563.5	13253.1	16941.6	75.4	101063.7	2839.3	103827.5	2.8E+03
Fibra de madera (kg)	0.0	90.7	0.0	0.0	0.0	0.0	90.7	0.0	90.7	2.1E-04



ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO

Materiales en común de viviendas con CR y GR										Incrementos por materiales exclusivos GR
2L-47 m ²										
Materiales	Cimientos	Paredes	Columnas y vigas	Techos	Pisos	Materiales extra	Total (kg)	Materiales extra	Total (kg)	Δ Materiales extra
Cenizas (kg)	36.7	23.0	42.8	32.0	65.3	7.7	207.6	7.7	207.6	2.2E-06
Dióxido de carbono en aire (kg)	2.6	150.0	79.0	11.4	23.2	0.0	266.1	0.0	266.1	0.0E+00
Arcilla y esquisto (kg)	1660.3	1039.5	1933.7	1448.0	2951.3	284.4	9317.3	284.4	9317.3	3.9E-03
Carbón (kg)	1167.9	2414.5	3312.6	1343.0	2555.2	152.7	10945.9	167.2	10960.3	1.4E+01
Agregado de construcción (kg)	14947.0	172.9	17408.4	13036.2	26570.1	2620.1	74754.7	3853.2	75987.7	1.2E+03
Aceite crudo (L)	415.7	1874.3	645.7	542.9	861.3	266.2	4606.1	286.2	4626.0	2.0E+01
Petroleo crudo como materia prima (L)	0.0	8.6	0.0	1419.0	0.0	82.9	1510.5	113.8	1541.4	3.1E+01
Dolomita (kg)	10.3	100.9	316.2	45.5	93.0	0.0	565.9	0.0	565.9	0.0E+00
Desechos de fierro (kg)	152.8	1451.8	4687.4	674.3	1378.8	0.0	8345.2	0.0	8345.2	0.0E+00
Agregado fino (kg)	9713.0	8484.8	11312.5	8471.3	17266.1	4004.7	59252.4	4004.7	59252.4	0.0E+00
Yeso (natural) (kg)	258.0	161.5	300.5	225.0	458.7	19.4	1423.2	19.4	1423.2	0.0E+00
Yeso sintético (kg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0E+00
Mineral de hierro (kg)	114.3	314.3	2423.0	374.5	765.4	17.7	4009.3	17.7	4009.3	2.9E-03
Lignito (kg)	-0.4	30.1	-12.8	-1.8	-3.8	0.0	11.3	0.0	11.3	0.0E+00
Caliza (kg)	5997.2	3793.4	7007.8	5378.5	10666.4	1034.4	33877.7	1034.4	33877.7	1.9E-03
Gas natural (m3)	336.2	1364.8	771.7	664.2	690.1	196.1	4023.1	228.8	4055.8	3.3E+01
Gas natural como materia prima (m3)	0.0	6.1	0.0	85.9	0.0	8.7	100.7	89.6	181.6	8.1E+01
Otro (kg)	0.0	182.6	0.0	0.0	0.0	0.0	182.6	0.1	182.7	5.1E-02
Arena (kg)	73.0	77.8	85.0	63.6	129.7	5.5	434.7	5.5	434.7	1.9E-05
Semi-cementoso de materiales (kg)	880.7	0.0	1025.7	768.1	1565.6	125.4	4365.6	125.4	4365.6	0.0E+00
Mineral de estaño (kg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0E+00
Uranio (kg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4E-04
Agua (L)	4422.1	28784.2	83412.1	13253.1	27076.0	310.4	157257.9	3074.2	160021.8	2.8E+03
Fibra de madera (kg)	0.0	127.5	0.0	0.0	0.0	0.0	127.5	0.0	127.5	2.1E-04



Tabla B 2. Listado de los recursos (materias primas) requeridos para cada componente de construcción de las viviendas de uno y dos niveles con una superficie de techo de 98 m².

Materiales en común de viviendas con CR y GR										Incrementos por materiales exclusivos GR
1L-98 m ²										
Materiales	Cimientos	Paredes	Columnas y vigas	Techos	Pisos	Materiales extra	Total (kg)	Materiales extra	Total (kg)	Δ Materiales extra
Cenizas (kg)	36.7	18.7	47.1	88.3	105.8	5.0	301.6	5.0	301.6	3.8E-06
Dióxido de carbono en aire (kg)	2.6	128.4	64.3	31.7	37.8	0.0	264.7	0.0	264.7	0.0E+00
Arcilla y esquisto (kg)	1660.3	843.5	2127.1	3990.6	4782.9	159.8	13564.3	159.9	13564.3	6.8E-03
Carbón (kg)	1167.9	2023.5	3064.2	3650.4	4143.8	76.3	14126.1	101.6	14151.4	2.5E+01
Agregado de construcción (kg)	14947.0	170.1	19149.9	35926.1	43059.5	1348.7	114601.1	3321.6	116574.0	2.0E+03
Aceite crudo (L)	415.7	1536.2	678.5	1453.8	1382.3	331.5	5798.0	364.3	5830.8	3.3E+01
Petroleo crudo como materia prima (L)	0.0	8.4	0.0	2969.7	0.0	173.1	3151.3	228.1	3206.3	5.5E+01
Dolomita (kg)	10.3	87.6	257.4	126.8	151.2	0.0	633.3	0.0	633.3	0.0E+00
Desechos de hierro (kg)	152.8	1206.7	3816.6	1879.6	2241.1	0.0	9296.7	0.0	9296.7	0.0E+00
Agregado fino (kg)	9713.0	6884.6	12444.2	23345.9	27981.4	3181.9	83551.0	3181.9	83551.0	0.0E+00
Yeso (natural) (kg)	258.0	131.0	330.6	620.2	743.3	0.0	2083.2	0.0	2083.2	0.0E+00
Yeso sintético (kg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0E+00
Mineral de hierro (kg)	114.3	311.9	1985.1	1042.7	1243.8	15.0	4712.8	15.0	4712.8	5.2E-03
Lignito (kg)	-0.4	26.3	-10.4	-5.1	-6.1	0.0	4.2	0.0	4.2	0.0E+00
Caliza (kg)	5997.2	3079.1	7702.0	14726.3	17286.0	584.4	49375.0	584.4	49375.0	3.5E-03
Gas natural (m3)	336.2	1200.3	736.8	1616.2	1118.9	189.8	5198.3	247.1	5255.6	5.7E+01
Gas natural como materia prima (m3)	0.0	5.8	0.0	179.9	0.0	18.2	203.8	159.9	345.6	1.4E+02
Otro (kg)	0.0	179.4	0.0	0.0	0.0	0.0	179.4	0.1	179.5	9.4E-02
Arena (kg)	73.0	69.2	93.5	175.4	210.2	0.0	621.3	0.0	621.3	3.4E-05
Semi-cementoso de materiales (kg)	880.7	0.0	1128.4	2116.9	2537.2	0.0	6663.1	0.0	6663.1	0.0E+00
Mineral de estaño (kg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0E+00
Uranio (kg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5E-04
Agua (L)	4422.1	25018.6	68504.8	36887.4	43994.0	159.8	178986.7	4997.0	183823.8	4.8E+03
Fibra de madera (kg)	0.0	109.5	0.0	0.0	0.0	0.0	109.5	0.0	109.5	3.7E-04



ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN TECHO ECOLÓGICO COMO TECNOLOGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN PEQUEÑOS INMUEBLES BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO

Materiales en común de viviendas con CR y GR										Incrementos por materiales exclusivos GR
2L-98 m2										
Materiales	Cimientos	Paredes	Columnas y vigas	Techos	Pisos	Materiales extra	Total (kg)	Materiales extra	Total (kg)	Δ Materiales extra
Cenizas (kg)	36.7	33.3	60.8	88.3	160.0	19.1	398.2	19.1	398.2	3.8E-06
Dióxido de carbono en aire (kg)	2.6	176.3	113.7	31.7	56.5	0.0	380.8	0.0	380.8	0.0E+00
Arcilla y esquisto (kg)	1660.3	1503.5	2748.5	3990.6	7230.8	731.0	17864.6	731.0	17864.6	6.8E-03
Carbón (kg)	1167.9	3444.0	4745.7	3650.4	6250.3	413.1	19671.4	438.4	19696.7	2.5E+01
Agregado de construcción (kg)	14947.0	294.2	24743.8	35926.1	65096.9	6889.6	147897.5	8862.5	149870.3	2.0E+03
Aceite crudo (L)	415.7	2717.8	919.5	1453.8	2105.0	590.2	8202.1	623.0	8234.8	3.3E+01
Petroleo crudo como materia prima (L)	0.0	8.8	0.0	2969.7	0.0	173.1	3151.7	228.1	3206.7	5.5E+01
Dolomita (kg)	10.3	132.0	455.2	126.8	226.3	0.0	950.6	0.0	950.6	0.0E+00
Desechos de fierro (kg)	152.8	2025.0	6748.7	1879.6	3355.3	0.0	14161.4	0.0	14161.4	0.0E+00
Agregado fino (kg)	9713.0	12272.9	16079.3	23345.9	42302.0	9119.2	112832.3	9119.2	112832.3	0.0E+00
Yeso (natural) (kg)	258.0	233.6	427.1	620.2	1123.7	63.7	2726.3	63.7	2726.3	0.0E+00
Yeso sintético (kg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0E+00
Mineral de hierro (kg)	114.3	321.5	3487.7	1042.7	1863.8	39.2	6869.2	39.2	6869.2	5.2E-03
Lignito (kg)	-0.4	38.9	-18.4	-5.1	-9.2	0.0	5.7	0.0	5.7	0.0E+00
Caliza (kg)	5997.2	5483.0	9961.2	14726.3	26132.6	2654.5	64954.9	2654.5	64954.9	3.5E-03
Gas natural (m3)	336.2	2067.3	1104.1	1616.2	1688.8	428.0	7240.6	485.3	7297.9	5.7E+01
Gas natural como materia prima (m3)	0.0	6.4	0.0	179.9	0.0	18.2	204.4	159.9	346.2	1.4E+02
Otro (kg)	0.0	298.6	0.0	0.0	0.0	0.0	298.6	0.1	298.6	9.4E-02
Arena (kg)	73.0	98.2	120.8	175.4	317.8	18.0	803.2	18.0	803.2	3.4E-05
Semi-cementoso de materiales (kg)	880.7	0.0	1458.0	2116.9	3835.7	411.1	8702.3	411.1	8702.3	0.0E+00
Mineral de estaño (kg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0E+00
Uranio (kg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5E-04
Agua (L)	4422.1	38990.5	120054.3	36887.4	65941.0	816.2	267111.6	5653.3	271948.7	4.8E+03
Fibra de madera (kg)	0.0	146.9	0.0	0.0	0.0	0.0	146.9	0.0	146.9	3.7E-04



Tabla B.3. Listado de las fuentes de energía requeridos para cada componente de construcción de las viviendas de uno y dos niveles con una superficie de techo de 47 m².

Fuente de energía	Fuentes de energía de viviendas con CR y GR (MJ)							Incrementos por materiales exclusivos GR
	1L-47 m²							
	Cimientos	Paredes	Columnas y vigas	Techos	Pisos	Materiales extra	Total (MJ)	Δ Materiales extra
Hidroeléctrica	48.5	102.0	46.8	84.0	55.1	9.1	345.5	6.8
No hidro renovables	68.4	139.8	65.5	121.5	77.9	11.5	484.7	10.2
Carbón	18470.5	25489.6	42924.9	23739.1	27976.5	711.9	139312.6	299.7
Diesel	9576.1	12333.6	12349.9	14608.2	13465.8	2392.3	64725.8	701.4
Materias prima	0.0	553.5	0.0	62639.8	0.0	3797.6	66990.9	4369.3
Gasolina	3.2	24.8	55.0	34.0	17.9	0.0	134.8	1.9
Aceite combustible pesado	11149.8	32384.7	10647.6	11870.4	12684.0	3758.3	82494.8	143.6
GLP	35.1	61.5	35.2	85.1	39.9	8.2	264.9	1.6
Gas natural	12696.8	28638.8	19292.3	25129.5	16403.3	3391.7	105552.3	1236.9
Nuclear	1332.7	8456.3	12794.9	4296.1	4681.8	108.5	31670.3	88.7
Madera	0.0	199.6	0.0	0.0	0.0	0.0	199.6	0.0
Consumo total de energía primaria	53380.9	108384.2	98212.2	142607.8	75402.1	14189.2	492176.4	6860.0

	Materiales en común de viviendas con CR y GR (MJ)							Incrementos por materiales exclusivos GR
	2L-47 m²							
Fuente de energía	Cimientos	Paredes	Columnas y vigas	Techos	Pisos	Materiales extra	Total (MJ)	Δ Materiales extra
Hidroeléctrica	48.5	176.2	64.4	84.0	87.8	18.7	479.5	6.8
No hidro renovables	68.4	245.9	90.5	121.5	124.2	25.6	676.2	10.2
Carbón	18470.5	42668.6	69591.7	23739.1	44633.2	2636.9	201740.0	299.7
Diesel	9576.1	22291.9	17654.3	14608.2	21797.4	5826.1	91754.0	701.4
Materias prima	0.0	592.4	0.0	62639.8	0.0	3797.6	67029.7	4369.3
Gasolina	3.2	37.2	97.1	34.0	28.6	0.0	200.1	1.9
Aceite combustible pesado	11149.8	59573.9	14666.9	11870.4	20216.2	4866.9	122344.0	143.6
GLP	35.1	113.0	48.3	85.1	63.5	15.9	360.9	1.6
Gas natural	12696.8	49799.1	29518.2	25129.5	26156.3	7403.0	150702.9	1236.9
Nuclear	1332.7	13710.5	22380.8	4296.1	7481.7	236.9	49438.6	88.7
Madera	0.0	279.5	0.0	0.0	0.0	0.0	279.5	0.0
Consumo total de energía primaria	53380.9	189488.1	154112.2	142607.8	120588.8	24827.7	685005.5	6860.0



Tabla B.4. Listado de las fuentes de energía requeridos para cada componente de construcción de las viviendas de uno y dos niveles con una superficie de techo de 98 m².

Fuente de energía	Fuentes de energía de viviendas con CR y GR (MJ)							Incrementos por materiales exclusivos GR
	1L-98 m ²							Δ Materiales extra
	Cimientos	Paredes	Columnas y vigas	Techos	Pisos	Materiales extra	Total (MJ)	
Hidroeléctrica	48.5	154.0	68.8	204.4	142.2	19.2	637.2	11.9
No hidro renovables	68.4	217.3	96.3	294.8	201.3	24.4	902.5	17.9
Carbón	18470.5	36122.4	62274.4	64412.1	72402.9	1504.4	255186.7	524.0
Diesel	9576.1	18404.2	18088.5	39096.9	34812.5	5028.2	125006.3	1141.9
Materias prima	0.0	572.9	0.0	131093.8	0.0	7933.0	139599.8	7694.8
Gasolina	3.2	32.1	79.1	80.9	46.4	0.0	241.7	3.1
Aceite combustible pesado	11149.8	48526.5	15652.6	31426.3	32764.8	7856.5	147376.5	251.8
GLP	35.1	93.5	51.7	198.7	102.9	17.2	499.2	2.7
Gas natural	12696.8	43597.4	28127.6	61164.6	42410.3	7165.3	195161.9	2164.1
Nuclear	1332.7	11686.5	18432.9	11516.2	12155.3	228.7	55352.1	155.1
Madera	0.0	239.6	0.0	0.0	0.0	0.0	239.6	0.0
Consumo total de energía primaria	53380.9	159646.6	142871.8	339488.7	195038.7	29776.7	920203.3	11967.3

Fuente de energía	Materiales en común de viviendas con CR y GR (MJ)							Incrementos por materiales exclusivos GR
	2L-98 m ²							Δ Materiales extra
	Cimientos	Paredes	Columnas y vigas	Techos	Pisos	Materiales extra	Total (MJ)	
Hidroeléctrica	48.5	263.7	91.6	204.4	215.0	42.8	866.0	11.9
No hidro renovables	68.4	377.5	128.9	294.8	304.3	58.5	1232.2	17.9
Carbón	18470.5	60237.3	99833.5	64412.1	109108.8	6927.6	358989.8	524.0
Diesel	9576.1	32262.3	25165.3	39096.9	53207.9	12937.3	172245.7	1141.9
Materias prima	0.0	611.8	0.0	131093.8	0.0	7932.8	139638.4	7694.8
Gasolina	3.2	49.0	139.8	80.9	69.5	0.0	342.5	3.1
Aceite combustible pesado	11149.8	86056.2	20877.7	31426.3	49521.8	11164.0	210195.8	251.8
GLP	35.1	165.9	68.7	198.7	155.6	36.0	660.0	2.7
Gas natural	12696.8	75027.8	42235.1	61164.6	64009.3	16159.5	271293.1	2164.1
Nuclear	1332.7	19031.9	32209.1	11516.2	18224.9	540.9	82855.6	155.1
Madera	0.0	319.4	0.0	0.0	0.0	0.0	319.4	0.0
Consumo total de energía primaria	53380.9	274402.7	220749.7	339488.7	294817.1	55799.5	1238638.6	11967.3