

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR
EN HUANCAYO**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil que presenta el bachiller:

Santos Abel Corzo Remigio

ASESOR

Ramzy Kahhat Abedrabbo, Ph. D.

Lima, Septiembre de 2016

RESUMEN

El Perú desde hace unos años experimenta el denominado *boom* de la construcción. Esta realidad se refleja en el considerable incremento de proyectos ejecutados y manufactura de productos de construcción (cemento y barras de acero). Si bien el crecimiento del sector genera mayores ingresos y el aporte al PBI es considerable, este óptimo panorama para el sector también ha traído consigo problemas de índole medioambiental.

Ante esta realidad se empleó el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como metodología para la estimación de los impactos ambientales. Se analizó una vivienda unifamiliar tipo B en la ciudad de Huancayo, ciudad que ocupa el séptimo lugar en entrega de licencias de construcción. Asimismo, se efectuó el análisis en la clasificación B, debido a que existen pocos estudios de esta índole en este tipo de vivienda que carece de diseño estructural.

Para el desarrollo de este ACV, se definieron las siguientes etapas: pre-uso, que involucra las fases de manufactura y construcción; uso, que involucra las fases de mantenimiento y energía operativa; y fin de vida. Además, se definieron ocho indicadores ambientales: consumo de energía primaria, potencial de calentamiento global, potencial de acidificación marina, efectos sobre la salud humana, potencial de eutrofización, potencial de *smog* y potencial de agotamiento de ozono.

Adicionalmente, se compararon dos sistemas de tabiquería, bloques de concreto y ladrillos de arcilla, para cada uno de los indicadores ambientales definidos en este proyecto. Además, se plantearon alternativas para la implementación de otros materiales de menor consumo energético y bajas emisiones de CO₂.

Los resultados comprueban que la etapa de uso —principalmente en la fase de energía operativa— es la que consume mayor cantidad de energía primaria y la que provoca mayor potencial de acidificación marina. Sin embargo, en el resto de indicadores ambientales, la etapa de pre-uso —principalmente la fase de manufactura— surge como la de mayor relevancia, por el alto porcentaje en el potencial de efectos sobre la salud y potencial de *smog*. Asimismo, se verifica el poco porcentaje de participación de la etapa de fin de vida en todos los indicadores evaluados.

Finalmente, en la comparación de los sistemas de tabiquería, los resultados demuestran un mayor consumo de energía primaria y generación de cargas ambientales cuando se utilizan bloques de concreto en vez de ladrillos de arcilla.

ÍNDICE

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 2 ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Origen del ACV en el mundo	7
2.2 Aplicación del ACV en proyectos de construcción	14
CAPITULO 3 METODOLOGÍA.....	18
3.1 Hipótesis.....	18
3.2 Objetivos	18
3.3 Materiales y métodos	19
CAPITULO 4 CASO DE ESTUDIO.....	28
4.1 Alcances y limitaciones del proyecto.....	28
4.2 Datos necesarios de la vivienda y requisitos de los mismos.....	30
4.3 Etapas del ciclo de vida	30
4.4 Definición del sistema	31
4.5 Elección de matriz energética.....	36
CAPITULO 5 RESULTADOS	41
5.1 Evaluación de cargas ambientales generadas	41
5.2 Comparación entre tabiquería de bloques de concreto y ladrillos de arcilla	58
CAPITULO 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	67
CAPITULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
REFERENCIAS	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Variación del porcentaje de proyectos de construcción por mes respecto al mismo mes del año anterior.....	2
Tabla 1.2 Variación de despacho de cemento por mes respecto al mismo mes del año anterior	2
Tabla 1.3 Variación de producción de barras de acero por mes respecto al mismo mes del año anterior	3
Tabla 1.4 Licencias para la construcción otorgada por la municipalidad para construcción de Viviendas Unifamiliares y Multifamiliares.....	6
Tabla 2.1 Interés en el LCA a partir del siglo XXI	17
Tabla 3.1 Valores equivalente de emisión de gases evaluado en 100 años.....	21
Tabla 4.1 Matriz energética de estados norteamericanos	38
Tabla 5.1 Elementos empleados en el proyecto de vivienda unifamiliar	42
Tabla 5.2 Resultado de cargas ambientales para cada etapa del ciclo de vida	43
Tabla 5.3 Materiales asumidos por el <i>software</i> para el diseño de la vivienda.....	56
Tabla 5.4 Impactos ambientales generados en cada indicador ambiental para dos tipos de tabiquería	59
Tabla 6.1 Consumo de energía primaria por metro cuadrado para distintos proyectos de ACV en cada etapa del ciclo de vida	68
Tabla 6.2 Consumo total de energía eléctrica y gas natural para dos viviendas unifamiliares	70
Tabla 6.3 Utilización de materiales para el desarrollo de dos viviendas unifamiliares..	71
Tabla 6.4 Porcentaje de participación de las etapas de ciclo de vida por cada indicador ambiental en una vivienda tipo A en Lima.....	72
Tabla 6.5 Porcentaje de participación de las etapas de ciclo de vida por cada indicador ambiental en la vivienda tipo B en Huancayo	72
Tabla 6.6 Alternativas al uso de ladrillo y evaluación del impacto de ciclo de vida de 1kg de ladrillo	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Tasa de crecimiento del sector construcción con proyección hasta el 2012.	4
Figura 4.1 Etapas del análisis de ciclo de vida.....	31
Figura 4.2 Plano de arquitectura de la primera planta	32
Figura 4.3 Plano de arquitectura de la segunda planta.....	33
Figura 4.4 Elevación principal de la vivienda	34
Figura 4.5 Ubicación geográfica de proyecto estudiado	35
Figura 4.6 Matriz Energética del Perú 2012.....	37
Figura 4.7 Fuentes de energía primaria en el Perú para la producción de Electricidad	38
Figura 4.8 Fuentes de energía primaria en los estados de Florida, Nueva York, California y Georgia	39
Figura 4.9 Comparación de fuentes de energía eléctrica	40
Figura 5.1 Porcentaje de utilización de energía primaria en las tres etapas del ciclo de vida	44
Figura 5.2 Utilización de energía primaria por etapas y sub-etapas del ciclo de vida ..	45
Figura 5.3 Porcentaje de Potencial de calentamiento global en las tres etapas del ciclo de vida.....	46
Figura 5.4 Potencial de calentamiento global por etapa y sub-etapas del ciclo de vida	47
Figura 5.5 Porcentaje de Potencial de acidificación marina en las tres etapas del ciclo de vida.....	48
Figura 5.6 Potencial de acidificación marina por etapa y sub-etapas del ciclo de vida	49
Figura 5.7 Porcentaje de potencial de efecto sobre la salud en las tres etapas del ciclo de vida.....	49
Figura 5.8 Potencial de efecto sobre la salud por etapas y sub-etapas del ciclo de vida	50
Figura 5.9 Porcentaje de potencial de eutrofización en las tres etapas del ciclo de vida	51
Figura 5.10 Potencial de eutrofización por etapas y sub-etapas del ciclo de vida	51
Figura 5.11 Porcentaje de potencial de agotamiento de ozono en las tres etapas del ciclo de vida.....	52
Figura 5.12 Potencial de agotamiento de ozono por etapas y sub-etapas del ciclo de vida	52
Figura 5.13 Porcentaje de potencial de formación de smog en las tres etapas del ciclo de vida.....	53

Figura 5.14 Potencial de smog por etapas y sub-etapas del ciclo de vida	53
Figura 5.15 Porcentaje de consumo de combustibles fósiles en las tres etapas del ciclo de vida.....	54
Figura 5.16 Consumo de combustibles fósiles por etapas y sub-etapas del ciclo de vida	55
Figura 5.17 Porcentaje de participación de cada etapa de ciclo de vida en cada uno de los indicadores ambientales.....	57
Figura 5.18 Energía primaria en las etapas y sub-etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería	60
Figura 5.19 Potencial de calentamiento global en las etapas y sub-etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería	61
Figura 5.20 Potencial de acidificación marina en las etapas y sub-etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería	62
Figura 5.21 Potencial de efecto sobre la salud en las etapas y sub-etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería	63
Figura 5.22 Potencial eutrofización en las etapas y sub-etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería.....	64
Figura 5.23 Potencial de smog en las etapas y sub-etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería	65
Figura 5.24 Consumo de combustibles fósiles en las etapas y sub etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería	66
Figura 6.1 Porcentaje de uso de energía operativa en oficinas en Tailandia.....	69
Figura 6.2 Distribución de emisiones de CO ₂ en la etapa de uso.....	73

ABREVIATURAS

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
BCRP	Banco Central de Reserva del Perú
Bt/y	Billion tons per year (1 000 000 000 t por año)
CILCA	Conference International in Life Cycle Assessment
CFC	clorofluorcarbono
Cm	centímetro
COV	compuestos orgánicos volátiles
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
EP	Potencial de Eutrofización
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
GEI	gases de efecto invernadero
HCl	ácido clorhídrico
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
ISO	Organización Internacional de Normalización
kg/mol	kilogramo por mol
kg/cm ²	kilogramo por centímetro cuadrado
kWh	kilo Watt hora
L	litros
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
m	metro
m ²	metro cuadrado
m ³	metro cúbico
MJ	Mega Joules
MPa	Mega Pascales
MRI	Midwest Research Institute
PBI	Producto Bruto Interno
p.e.	por ejemplo
PE	polietileno
pH	potencial de hidrógeno
PM	material particulado
POCP	formación fotoquímica de ozono
PVC	policloruro de vinilo
REPA	Rural Environmental Planning Asociation
RICV	Red Iberoamericana de Ciclo de Vida
ton	toneladas
TRACI	Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts
USEPA	US Environmental Protection Agency
µm	micrómetro
°C	grados Centígrados

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente la construcción es señalada como una de las principales actividades que altera negativamente el medio ambiente, debido a la sobreexplotación de los recursos consumidos y la contaminación que generan sus diversos procesos. Por esta razón, se estima que en los próximos 50 años se duplicará el uso de los recursos para todos los sectores productivos como consecuencia también del crecimiento acelerado de la población (Mercado, 2002). Además, se prevé que el estándar de calidad de vida de las personas será entre 4 a 8 veces mayor que el actual. Debido a estas condiciones el sector constructivo debe aplicar procedimientos más eficientes —entre 15 y 50%— en comparación con los niveles actuales (Mercado, 2002). Esta eficiencia requerida de la construcción debe involucrar la conservación de recursos naturales, optimización de uso de materias primas y energía, reducción de emisiones, adaptabilidad, durabilidad y reciclabilidad de las construcciones.

Según estimaciones del *Worldwatch Institute*, del total de recursos consumidos mundialmente, la industria de construcción consume el 40% de arena y piedras, 25% de madera virgen, 16% de agua y 40% de energía (Roodman D.M., y Lenssen, N., 1995). Cifras que sugieren que la industria de construcción, solo hasta la etapa de la ejecución del proyecto, genera mayores impactos ambientales negativos con respecto a otros sectores productivos. Entonces, queda claro que los impactos ambientales negativos generados se verían notoriamente incrementados si se toman en cuenta las etapas de manufactura de materiales, uso y disposición final de los proyectos de construcción.

El Perú no es ajeno a esta realidad, debido al notorio crecimiento acelerado que ha tenido el sector de construcción. Por ello, el incremento en la cantidad de recursos empleados para su abastecimiento ejerce mayor presión sobre el ambiente. Por ejemplo, el crecimiento mensual de proyectos de construcción se ha incrementado notoriamente desde el año 2004, aunque el último registro negativo medianamente importante fue en el mes de octubre con un descenso de 2.9% (INEI, 2014). En los últimos años se han notado crecimientos de hasta 26% y caídas máximas de 2.9% (véase tabla 1.1). Asimismo, el incremento en el sector de la construcción también se refleja en el aumento de despacho de cemento. Actualmente los registros son significativamente positivos y denotan el importante crecimiento que ha tenido esta actividad y su aporte al

crecimiento del sector. Por ejemplo, a inicios del año 2014, durante el mes de febrero, se presenta un incremento del 12.1 % respecto al 2013 (véase Tabla 1.2).

Tabla 1.1 Variación del porcentaje de proyectos de construcción por mes respecto al mismo mes del año anterior

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2014	3.20%	9.78%	3.06%									
2013	18.40%	14.56%	3.75%	26.48%	10.54%	6.98%	11.41%	7.71%	-1.34%	6.24%	2.27%	2.26%
2012	4.43%	14.03%	14.70%	15.18%	15.84%	20.56%	21.47%	17.57%	19.22%	16.33%	16.81%	5.34%
2011	16.21%	4.90%	3.60%	0.10%	3.70%	-2.75%	-2.90%	6.66%	1.63%	4.40%	3.23%	3.80%
2010	10.17%	16.07%	24.14%	21.08%	20.88%	22.70%	12.33%	14.15%	22.97%	10.71%	23.78%	12.49%
2009	4.50%	4.73%	6.30%	-1.48%	-0.59%	-1.30%	6.38%	5.21%	3.29%	10.74%	13.83%	19.74%
2008	20.99%	22.13%	13.13%	33.86%	14.31%	16.45%	18.09%	10.35%	19.70%	11.85%	10.21%	10.33%
2007	10.97%	5.32%	10.56%	13.00%	24.60%	22.20%	25.20%	14.74%	10.80%	19.87%	13.14%	24.48%
2006	14.09%	14.78%	20.08%	4.84%	19.26%	15.97%	11.62%	21.35%	14.52%	18.16%	14.78%	8.08%
2005	4.63%	3.93%	-0.15%	10.64%	8.04%	3.62%	10.18%	10.77%	11.71%	12.55%	13.31%	13.99%
2004	6.86%	5.94%	8.73%	3.56%	3.02%	5.41%	0.68%	4.49%	4.86%	-2.90%	8.19%	7.82%

Fuente: Elaboración propia con datos del INEI (2014)

Tabla 1.2 Variación de despacho de cemento por mes respecto al mismo mes del año anterior

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2014	3.9%	12.1%	4.4%	-2.6%								
2013	21.1%	11.9%	1.9%	23.8%	35.1%	24.2%	22.7%	25.4%	15.0%	25.8%	18.6%	23.9%
2012	12.6%	14.2%	16.3%	17.0%	18.0%	13.9%	18.7%	20.7%	21.0%	23.6%	28.8%	7.0%
2011	27.0%	17.6%	31.1%	14.6%	20.7%	7.0%	4.9%	17.3%	12.7%	22.4%	20.0%	30.1%
2010	10.3%	15.4%	26.8%	19.7%	21.6%	20.2%	13.1%	11.5%	16.8%	9.7%	18.0%	11.1%
2009	5.5%	3.7%	6.2%	-2.0%	-1.6%	1.8%	4.8%	5.0%	1.6%	7.4%	12.7%	11.9%
2008	12.0%	18.1%	10.1%	18.9%	7.9%	13.1%	9.1%	5.7%	13.6%	7.2%	1.2%	3.0%
2007	8.0%	-7.9%	-3.5%	5.9%	-0.3%	9.8%	13.4%	11.2%	8.0%	15.2%	15.4%	22.4%
2006	16.4%	21.5%	20.2%	3.2%	23.1%	17.0%	10.1%	9.7%	9.7%	7.4%	13.7%	4.3%
2005	10.7%	7.5%	8.0%	2.0%	1.6%	7.6%	14.7%	24.8%	18.8%	11.5%	13.8%	11.9%
2004	-0.5%	-0.4%	18.7%	23.6%	17.0%	5.3%	22.8%	3.0%	-1.8%	20.9%	18.3%	7.2%

Fuente: Elaboración propia con datos del INEI (2014)

En la misma línea, este incremento se refleja también en el aumento de la producción de barras de acero. Si bien esta actividad no ha tenido ciclos continuos de permanente crecimiento, se puede apreciar que en el 2006 existe un incremento considerable con respecto a los años pasados. Pese a que el registro negativo más importante en la producción de barras de acero fue en el mes de diciembre de 2008 con un descenso de 88.7% respecto al mismo mes en 2007, el crecimiento fue valorable. No obstante, a

inicios de 2014 se presenta un incremento importante, con un crecimiento final de 27,8% respecto al mes de abril del año 2013 (INEI, 2014) (véase Tabla 1.3).

Tabla 1.3 Variación de producción de barras de acero por mes respecto al mismo mes del año anterior

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2014	22.0%	35.4%	11.5%	27.8%								
2013	7.4%	13.3%	-6.1%	20.6%	38.6%	37.0%	63.6%	21.0%	5.0%	-10.7%	0.9%	21.1%
2012	33.9%	-8.4%	20.7%	13.5%	92.1%	6.5%	-27.1%	37.0%	9.8%	-1.1%	15.1%	21.1%
2011	-6.2%	22.8%	14.3%	-6.5%	-43.2%	-5.5%	14.7%	-12.6%	30.2%	3.0%	15.5%	3.4%
2010	336.4%	132.1%	40.0%	17.7%	57.9%	33.6%	-3.0%	-3.5%	-23.7%	-3.6%	-17.6%	37.3%
2009	-76.7%	-42.8%	-4.3%	-14.2%	-25.0%	0.2%	18.4%	19.1%	17.1%	39.1%	322.1%	748.5%
2008	128.0%	1.6%	58.6%	86.2%	196.8%	58.2%	47.6%	26.0%	8.7%	-8.9%	-73.0%	-88.7%
2007	-36.0%	24.2%	42.0%	2.6%	-44.7%	12.8%	1.3%	101.2%	71.6%	54.1%	74.0%	36.7%
2006	18.6%	28.9%	-36.1%	25.8%	41.8%	-12.0%	46.5%	1.6%	-9.1%	10.4%	-5.3%	-12.5%
2005	33.1%	-13.1%	-9.2%	-5.1%	-2.6%	14.8%	5.1%	-25.2%	7.3%	-4.9%	47.0%	23.6%
2004	-17.4%	14.8%	8.4%	47.8%	30.0%	-2.1%	-2.4%	-6.7%	-3.5%	5.7%	11.7%	2.3%

Fuente: Elaboración propia con datos del INEI (2014)

Producto del crecimiento del rubro de la construcción y la producción de mayor cantidad de materiales para la implementación de los proyectos, el aporte de este sector al Producto Bruto Interno (PBI) se ha incrementado. En 2008 y 2010, el PBI registró los crecimientos más importantes en la última década, siendo el incremento del sector construcción uno de los principales factores. El aporte del sector construcción fue bastante significativo, colocándose así como el segundo sector de mayor aporte detrás del sector comercio (INEI, 2014).

En la actualidad el sector construcción se ha posicionado en nuestro país como uno de los más importantes, principalmente por el aumento de la inversión pública y privada en los distintos proyectos constructivos alrededor de nuestro país. Prueba de ello es el incremento en la tasa de crecimiento anual del PBI en el sector construcción (INEI, 2014) (véase Figura 1.1).

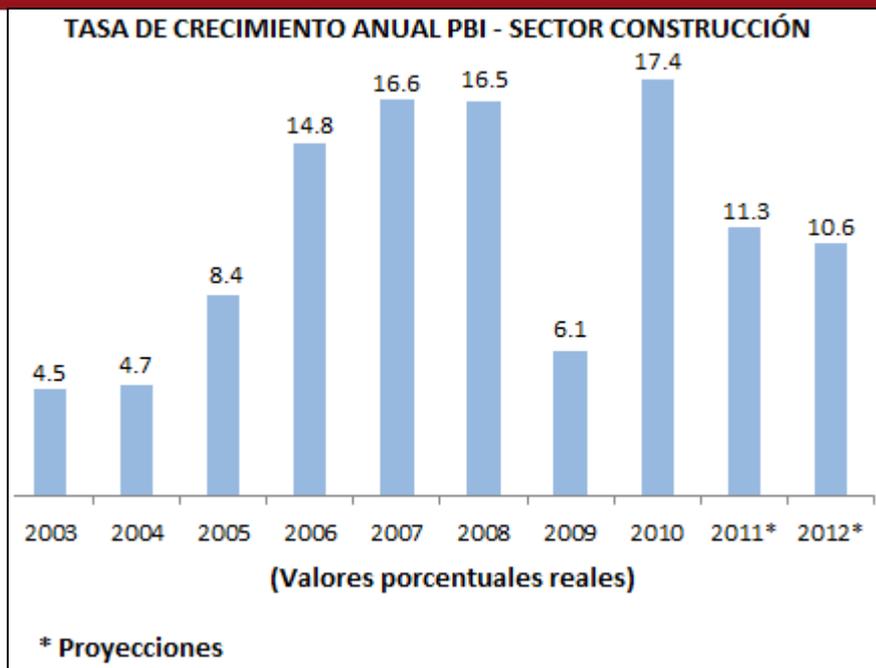


Figura 1.1 Tasa de crecimiento del sector construcción con proyección hasta el 2012

Fuente: INEI y BCRP 2010

Este incremento de inversiones y proyectos de construcción han provocado que en Perú, al igual que en muchos otros países, se generen problemas medioambientales. Pese a que los países en vías de desarrollo, como el nuestro, no se han implementado alternativas eficientes que puedan hacer frente, la industria de la construcción local debe asumir este gran reto. Por ello, se debe tomar como ejemplo a los países industrializados, donde ya se aplican sistemas integrados y herramientas para la preservación del medio ambiente y el desarrollo sostenible. Por ejemplo, los sistemas integrados de residuos han dado como resultado las tasas más altas de reciclaje de residuos de construcción: 86% en Holanda, 60% en Alemania y 50% en Suecia. Además, la aplicación de herramientas de evaluación ambiental sirven para estimar los impactos ambientales que se generan por esta industria (Mercado, 2002).

Sin embargo, estos resultados no provienen de acciones aisladas. Son resultado de la aplicación efectiva de la legislación, factor importante que ha asegurado el éxito en cada lugar donde se ha implementado. Este es el caso de Holanda que, pese a ser un país que dispone de pocos recursos naturales y un área geográfica pequeña, desde marzo de 1997 cuenta con una reglamentación que prohíbe la disposición final de residuos de la construcción y demolición. Similar situación se aprecia en Alemania, Suiza y Austria, donde se aplican reglamentaciones técnicas desarrolladas para el reciclaje de desechos de construcción. Estas iniciativas tienen el soporte de la Unión Europea, que también está gestando nuevas normas para sus miembros sobre la base de las ISO 14000 de

gestión ambiental e ISO 9000 de gestión de la calidad. Así por ejemplo, la Unión Europea ha gestado las normativas ISO 14040 e ISO 14044 que están orientadas a la aplicación del ACV (Mercado, 2002).

Ante este escenario de alerta mundial, la construcción en nuestro país debe enfocar el *boom constructivo* que ha tomado lugar en los últimos años, para implementar nuevas metodologías que aporten herramientas para la preservación del medio ambiente y la reducción de los impactos negativos que esta genera. Sin embargo, hoy en día se nota la ausencia de proyectos constructivos públicos o privados, orientados a la conservación del medio ambiente, ya sea por la poca inversión o por desconocimiento de metodologías eficientes.

Por esta razón, es importante y necesario que la idea de sustentabilidad cobre mayor fuerza en los distintos proyectos que se realizarán a futuro en nuestro país. Esto debido a que el aumento del número de construcciones trae consigo el incremento de población urbana y, como consecuencia, el incremento de consumo de recursos y energía. Ante este escenario, el empleo del método de análisis de ciclo de vida surge como una importante herramienta para determinar las cargas ambientales que se generan y buscar alternativas que ayuden a mitigar los impactos negativos potenciales.

Junín es la séptima región en donde se desarrolla la mayor cantidad de proyectos constructivos en nuestro país (véase Tabla 1.4). Por ello, esta investigación se sostiene en la necesidad de obtener datos objetivos de la cantidad de impactos ambientales que se generan en las diferentes etapas de la construcción de una vivienda unifamiliar del tipo B en la provincia de Huancayo. Además, debido a los escasos estudios realizados en este rubro en nuestro país, el presente proyecto de tesis pretende servir como fuente bibliográfica para posteriores estudios en esta misma línea de aplicación de ACV en la construcción.

Tabla 1.4 Licencias para la construcción otorgada por la municipalidad para construcción de Viviendas Unifamiliares y Multifamiliares

REGIÓN	LICENCIAS PARA CONSTRUCCIÓN		TOTAL
	VIVIENDAS UNIFAMILIARES	VIVIENDAS MULTIFAMILIARES	
Amazonas	269	27	296
Ancash	884	127	1011
Apurímac	482	102	584
Arequipa	979	558	1537
Ayacucho	635	68	703
Cajamarca	448	139	587
Callao 1/	67	108	175
Cusco	726	302	1028
Huancavelica	358	39	397
Huánuco	226	84	310
Ica	6 999	866	7 865
Junín	1 157	182	1 339
La Libertad	1 991	321	2 312
Lambayeque	968	63	1031
Lima	7 352	3 199	10 551
Loreto	493	40	533
Madre de Dios	77	21	98
Moquegua	100	31	131
Pasco	196	4	200
Piura	1 161	188	1 349
Puno	1 021	136	1 157
San Martín	1 332	25	1 357
Tacna	280	50	330

Adaptado de licencias para la construcción otorgadas por la municipalidad por tipo, según departamento, 2011.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) - Registro Nacional de Municipalidades 2012.

CAPITULO 2 ESTADO DEL ARTE

En los últimos años se han realizado estudios en base a la metodología principal del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), como por ejemplo, la comparación de cargas ambientales generadas por materiales utilizados en la construcción o remodelación de edificios. El constante desarrollo y aplicación de esta metodología crece con el paso del tiempo en diferentes países. Es así que se ejecutan desde hace varios años, una serie de investigaciones básicas de impacto ambiental para productos específicos en diferentes compañías. En esta sección se presenta un breve resumen de los avances que ha tenido esta metodología a través del tiempo en las diferentes partes de nuestro planeta.

2.1 Origen del ACV en el mundo

Los inicios de la metodología de ACV se atribuyen a una investigación que se realizó entre 1960 y 1970 por el Departamento de Energía de Estados Unidos. Este estudio determinó los requerimientos de energía de algunos procesos y sistemas para el análisis de los efectos ambientales por el empleo de energía. Además, en el año 1963 el profesor Harold Smith realizó uno de los primeros estudios en los que se empezaron a tener en cuenta los impactos ambientales. Este estudio se presentó en la Conferencia Mundial de Energía en 1963, donde se informó sobre las cantidades de energía para la fabricación de productos químicos (Bishop, 2000).

En 1969 se realizó un estudio para determinar cantidades de energía, materiales e impactos ambientales empleados en el ciclo de vida de envases. Este estudio fue realizado por encargo de la compañía Coca-Cola (Ecobilan, 2002). En la misma línea, en 1971 se llevó a cabo un estudio encargado por Mobil Chemical Company en el que se analizaron las bandejas de espuma de poliestireno y de pulpa de papel, que en esos años se utilizaban para empacar carne en los mercados. Luego, en 1972 se muestran indicios de preocupación por el crecimiento acelerado de la población mundial y la escasez de recursos energéticos y materia prima que puede traer consigo. Esta problemática fue planteada en el informe "Límites del crecimiento" de la científica ambiental Donella H. Meadows y colegas, auspiciados por el Club de Roma 2. Asimismo, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US Environmental Protection Agency, USEPA) encomendó investigaciones para evaluar las implicaciones ambientales generadas por la utilización de envases para bebidas gaseosas. Este estudio debía confirmar la conveniencia de utilizar el uso de botellas y latas retornables en vez de las no retornables (Chacón, 2008).

En ese mismo año se llevó a cabo en Estocolmo la "Conferencia de las Naciones Unidas de 1972 sobre Medioambiente Humano" (USEPA, 2000). Esta cumbre es reconocida mundialmente como uno de los primeros escenarios internacionales donde se discutió sobre la protección ambiental, crecimiento y desarrollo económico. Además, esta conferencia sentó las bases iniciales que luego se plantearon de manera formal en el Informe Brundtland de 1987, que fue presentado a las Naciones Unidas (ONU) y donde se aborda oficialmente el concepto de desarrollo sostenible (Brundtland, 1987).

Luego, abarcando otras áreas de desarrollo, en 1973 se creó en Estados Unidos el primer software para el Análisis de Ciclo de Vida; sin embargo, debido a lo innovador del proyecto, este presentaba limitaciones en la veracidad de respuestas que ofrecía y los errores en la lectura de los datos eran comunes. Asimismo, en 1976 la Agencia Federal de Energía de Estados Unidos, hoy en día el Departamento de Energía, puso a dominio público bases de datos y la metodología REPA (cuantificación de recursos y descargas ambientales de productos), derivada de estudios realizados por Franklin Associates y Research Triangle Institute sobre envases de bebidas (Reed, 2012).

El interés en el desarrollo del concepto de ACV creció de forma significativa principalmente por el incremento mundial del precio del petróleo, sumado a la escasez mundial de este recurso debido a la guerra entre Irán e Irak en el año 1980, que para ese entonces eran la principal fuente de suministro. A partir de ese momento, se comenzaron a buscar alternativas no solo para el ahorro de energía, sino también para la generación de la misma como, por ejemplo, la energía eólica. Es así que surgieron investigaciones y estudios alrededor del mundo para establecer nuevos conceptos y procedimientos a fin de implementar herramientas innovadoras que sirvan para la protección del medio ambiente.

A fines del siglo XX la industria automovilística generaba gran impacto ambiental por la utilización de artículos, tales como motores, parachoques y pinturas, que eran un motivo de preocupación ambiental. Por ello, se realizó un proyecto para encontrar un diseño eco-amigable de un tablero de instrumentos. Para hacer un análisis exhaustivo del producto, se llevó a cabo un estudio de ACV básico de varios instrumentos que eran componentes del tablero. Asimismo, se realizaron algunas reducciones en el uso de materiales y se desarrollaron mejoras en la capacidad de reciclaje de los mismos. Los resultados más importantes se hallaron a partir de la mejora del sistema de ventilación, ya que se podía disminuir el uso del ventilador y esto conllevó a una reducción en el consumo de combustible de unos 50 litros durante el ciclo de vida del vehículo (UNEP, 1996).

Luego de años de desarrollado significativo, el ACV es reconocido en Estados Unidos como un método analítico de recopilación y evaluación de entradas, salidas e impactos ambientales potenciales debido a la utilización de un producto o la prestación de un servicio en todas las etapas de su ciclo de vida (NTC-ISO 14040, 1997). En ese sentido, el ACV es definido como "la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema producto a través de su ciclo de vida" (NTC-ISO 14040, 1997). Esta definición fue aceptada y fomentada a partir del año 1991; sin embargo, pese al contenido objetivo de la metodología, aún tenía un porcentaje de subjetividad importante (Werner, 2005).

Mientras tanto en Canadá, durante la primera mitad de los años noventa, las grandes empresas y los sectores industriales más importantes fueron los principales actores que comenzaron el estudio y aplicación del ACV en industrias como la del aluminio, plásticos, productos forestales, acero, pulpa y papel, autopartes, energía eléctrica, química y telefonía (Young, 2003). Es así que en 1991, la compañía Alcan Aluminium Ltd. inicia un proyecto conjuntamente con los Estados Unidos sobre el inventario de ciclo de vida de envases de aluminio para bebidas. Así también, las empresas fabricantes de plástico de esos años ayudaron a la creación de bases de datos de inventario de productos de resinas, a través del Consejo Industrial de Plásticos y Medio Ambiente. Otro importante estudio, titulado como "Los efectos ambientales de los materiales de la construcción" (Environmental effects of building materials), fue desarrollado en 1995 por el Consejo Canadiense de la Madera. Este continúa siendo muy activo en el rubro de la arquitectura y construcción sostenible debido a la diversidad de materiales analizados y datos altamente específicos (Young, 2003).

En 1998, algunas de las empresas internacionales hicieron un estudio de ACV de un periódico de circulación diaria y también de una revista semanal, para identificar las implicancias ambientales que acarreaban sus publicaciones (Chacón, 2008). Asimismo, el gobierno canadiense cumplió un rol protagónico en el impulso del ACV hacia comienzos de los años noventa. Muestra de ello es que el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente publicó hacia comienzos de los años noventa "Perfiles Ambientales: lineamientos para ayudar a la industria en el logro de las metas del protocolo nacional de empaques y de las fuentes de datos para los análisis de ciclo de vida de los productos de empaque canadienses" (Young, 2003).

En Europa, el Reino Unido cimentó el desarrollo del ACV en base a los estudios REPA, que fueron los que abrieron el camino para el desarrollo de varios proyectos liderados por el doctor Bruce Hannon, de la Universidad de Illinois. Estas investigaciones tuvieron

una influencia en el desarrollo del ACV, en particular sobre el doctor Ian Boustead, de la Open University (Baumann Henrike, 2004). En 1972, el doctor Boustead inició el estudio de un libro sobre la producción de vidrio. Fue así que encontró los trabajos realizados por el profesor Bruce Hannon y a partir de allí adaptó esta metodología para el cálculo del uso total de energía de diferentes clases de envases para la leche (vidrio, plástico, acero y aluminio) (Boustead, 1996). Esta experiencia le sirvió para perfeccionar su método y aplicarlo a una gama variada de materiales, que fueron presentados en el libro titulado "Manual para el análisis industrial de energía" (*Handbook of industrial energy analysis*) en 1979 (Boustead, 1996).

Del mismo modo, Suecia se ha posicionado como un país líder en el campo del ACV a lo largo de los últimos años. Tetra Pak fue de las empresas pioneras en incursionar en la utilización del ACV, ya que deseaba emplear botellas de PVC; sin embargo, el uso de ese material fue cuestionado (Meadows, 1972). Luego, en 1977 el Laboratorio Federal Suizo para Ensayos e Investigación de Materiales (Swiss Federal Laboratories for Material Testing, EMPA) realizó dos importantes estudios en el campo del ACV. El primero fue conocido con el nombre de "Estudio BUS" ("Bundesamt für Umweltschutz") y fue realizado para el establecimiento de una base de datos sobre materiales para empaques (aluminio, vidrio, plástico, papel, cartón y hojalata). El segundo estudio fue sobre yogur y los envases apropiados para su distribución. La base de datos fue completada satisfactoriamente en 1984 y hoy en día es la más completa e importante a nivel mundial (Fink, 1997).

No obstante, si bien Estados Unidos y algunos países europeos han mostrado gran interés por el desarrollo del ACV y se han logrado avances, son los países nórdicos (Finlandia, Noruega, Suecia, Dinamarca e Islandia) los que han destacado por los avances en el diseño de metodologías y aplicación del ACV (Lindfors & Hoffman, 1995). Este desarrollo no solo se ha llevado a cabo mediante la publicación de normas ambientales, sino también con un marcado énfasis en la elaboración de guías y manuales específicos de implementación del ACV. Por ejemplo, en 1991 el Consejo Nórdico de Ministros inició la implementación del ACV dentro de los países miembros del consejo y un año más tarde elaboró un informe acerca del estado de las actividades del ACV en esa región, para verificar la eficiencia de la aplicación de esta metodología. Luego, durante los años 1993 a 1995 se priorizó el desarrollo de metodologías para la implementación del ACV en diferentes proyectos. Esta iniciativa arrojó tres informes: dos relativos a metodologías y otro sobre guías para aplicar el ACV. De 1993 a 1999 se expandieron las actividades en el ACV —algunas de ellas a nivel nacional y otras a nivel

regional—, entre las que destacaron el Proyecto de Ecología del Producto, el Proyecto Nórdico para la Industria Cementera y la Clasificación de Productos con Base en el Consumo de Energía y de Recursos (Hanssen, 1999).

Sin embargo, el escenario en Latinoamérica es diferente, ya que en esta región la implementación de esta metodología de ACV ha tardado algunos años y su desarrollo ha sido lento. Es por ello que aún no se han realizado un gran número de avances importantes que se tienen en otros países pioneros en la aplicación de esta metodología. Esta realidad compleja tiene componentes que deben ser reconocidos para intentar cambiarlos y procurar una continua mejora sustancial. Se puede mencionar los siguientes factores adversos como responsables del lento desarrollo del ACV en la región, identificados en un taller del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) en 1999 (Arena, 2001):

- Falta de personal altamente capacitado, además de disponibilidad de datos, sustento económico y disponibilidad de tiempo.
- Ausencia de investigaciones para el establecimiento de una base de datos de inventario de ciclo de vida en cada país dentro de la región.
- Percepción equivocada de la ineficacia de la metodología ACV por parte del sector público y privado. Esta situación provocó la ausencia de fuentes de financiamiento de proyectos de ACV, privando así a la región de investigaciones y de expertos en este campo.

Debido a estas limitaciones, el interés de los países de esta región por la implementación del ACV se inició tardíamente hacia principios del 2000. En el 2005, Costa Rica fue sede de la primera Conferencia Internacional de Ciclo de Vida en Latinoamérica, escenario que sirvió para fundar la Red Iberoamericana de Ciclo de Vida (RICV) con el fin de lograr el desarrollo y promoción del ACV en la región. Dos años después, se realizó una segunda conferencia llamada CILCA 2007, realizada en São Paulo, Brasil, donde principalmente se trataron temas de protección medioambiental. En la tercera conferencia, que fue realizada en 2009 en Chile, se abordaron temas como el desarrollo sustentable, manejo y reciclaje de desechos, Inventario del Ciclo de Vida, biocombustibles y eco eficiencia. En 2011, el congreso se llevó a cabo en México, donde la participación y el diálogo con el sector industrial se presentaron como el eje de desarrollo de estrategias. Esto se vio plasmado en la “Declaración de Coatzacoalcos: en el camino hacia Rio+20 con pensamiento de ciclo de vida”. En 2013, la conferencia se llevó a cabo en Argentina, donde la gestión sostenible de recursos, el diseño sustentable, la gestión de residuos y la huella de carbono e hídrica marcaron la pauta.

Estas conferencias son llevadas a cabo cada dos años y reúnen a los mejores especialistas en ACV de la región.

Los primeros indicios de aplicación de ACV en la región se llevaron a cabo en Brasil por el año 1994, con la conformación del Grupo de Apoyo a la Normalización, que participó activamente en el proceso de normalización del documento ISO/TC-207 (Seo & Kulay, 2006). Luego, en 1998 nació el Grupo de Prevención de la Contaminación (Grupo de Prevenção da Poluição, GP2) de la Universidad de São Paulo y se hizo público por primera vez un estudio en portugués que utilizaba la metodología ACV, titulado "Análise de Ciclo de Vida Produtos – Ferramenta Gerencial da ISO 14000", del profesor José Ribamar Brasil Chehebe (Chehebe, 1998). Asimismo, en el año 2002 el ACV pasó a ser tratado institucionalmente por la Asociación Brasileña de Ciclo de Vida, institución que buscaba fomentar el interés y desarrollo de la metodología en el sector estatal y privado. En los últimos años, el Instituto Brasileño de Información en Ciencia y Tecnología se ha empeñado en promover el desarrollo de un sistema de información para la conformación de Inventarios de Ciclo de Vida (ICV) nacionales, capacitaciones técnicas, guías de construcción de ACV y la definición de los impactos ambientales más relevantes en ese país.

Por su parte, México también se ha mostrado como un país muy activo en estudios referidos al ACV en Latinoamérica y ha conseguido un desarrollo importante en las actividades para la formación, investigación y la aplicación del ACV en la toma de decisiones. Sin embargo, la mayoría de estas acciones han sido independientes, carente de comunicación y cooperación (Peña, 2008). Hasta el 2010, la mayoría de estudios estuvieron enfocados en temas de gestión de residuos. Luego, en los últimos cinco años, se ha utilizado el ACV para la evaluación de sistemas de energía, análisis de huella de carbono, huella hídrica y un gran avance en el sector construcción. Además, se han hecho esfuerzos para la adaptación de base de datos internacionales al igual que en el resto de países en Latinoamérica (Güereca, Ochoa, Gilbert, & Suppen, 2015).

En Argentina, los estudios recientes de ACV han sido orientados a la agroindustria, construcción, fuentes renovables y a la incorporación de perfiles ambientales nacionales a una base de datos de alcance internacional (Bongiovanni & Tuninetti, 2015).

Mientras tanto, en Chile, la minería se ha posicionado como el motor fundamental para el desarrollo del ACV, debido principalmente a que esta industria es muy importante en la economía del país y para la generación de empleo: Chile aporta el 34 % de la producción de cobre en el mundo (Peña, 2008).

La situación de Colombia también es positiva, ya que algunas universidades impulsaron el conocimiento y la aplicación del ACV. En 1997, surgieron los primeros trabajos y talleres sobre ACV creados por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) y los Comités Técnicos de Normalización Espejos del ISO/TC-207. Con estos grupos se pretendía discutir y homologar en normas nacionales la serie de estándares internacionales de la familia ISO 14000, entre ellas la serie ISO 14040 sobre ACV.

Similar panorama se encuentra en el Perú, donde la actividad medioambiental inició recién hace once años, cuando se emitió la Ley N° 28611, llamada la Ley General del Ambiente. En los artículos 73 y 74, se define a los responsables de los proyectos como "titulares de operación" y se les responsabiliza de las emisiones, efluentes, descargas y demás impactos negativos que se puedan generar en el medio ambiente, en la salud poblacional y los recursos naturales. Como una medida de prevención, en el artículo 75 se define la importancia que tiene la prevención de riesgos y daño ambiental, así como también fomenta el emprendimiento de medidas de conservación y protección ambiental necesarias en cada una de las etapas de operación.

Luego, ese mismo año se fundó la Red Peruana de Análisis de Ciclo de Vida. Dicha red busca la difusión de la metodología de ACV y mostrar la importancia de su aplicación. Además, pretende generar intercambios de experiencias y contribuir en la creación de una base de datos nacional. Mediante esta red se realizó el proyecto denominado ACV de los biocombustibles en el Perú, donde el principal objetivo fue utilizar el ACV para comparar los biocombustibles (biodiesel y etanol) con los combustibles fósiles (diesel, gasolina de 84 octanos, gasolina de 97 octanos y el gas natural) (Red Peruana de Ciclo de Vida, 2011). Asimismo, se realizó un estudio de ICV de la minería artesanal de oro, el cual se basó en elaborar dos ICV para los departamentos de Madre de Dios y Ayacucho. El trabajo estuvo enfocado en la producción de oro a pequeña escala y en la minería artesanal. Del mismo modo, la Red Peruana de Ciclo de Vida realizó el ICV de llantas, investigación que tenía como objetivo el desarrollo de una base de datos para la fabricación de llantas, optimizar el proceso de fabricación y reducir las cantidades de desechos de materiales utilizados en el proceso de producción (Red Peruana de Ciclo de Vida, 2011).

En 2013, la RPCV realizó el ACV de ladrillos y bloques de concreto en el distrito San Jerónimo, Cusco, que tuvo como objetivo principal cuantificar y comparar las emisiones de gases efecto invernadero producidos en el ciclo de vida de los ladrillos artesanales, ladrillos mecanizados y bloques de concreto. En este proyecto, se utilizó la base de datos Ecolnvent y se ejecutó el análisis de impactos con el *software*

SimaPro. Finalmente, se obtuvo que el ladrillo mecanizado tiene 36% más impacto que uno artesanal, y que un bloque de concreto genera mayor impacto que los otros dos tipos de ladrillos (175% y 102% más, respectivamente) (Red Peruana de Ciclo de Vida, 2013).

Actualmente la Red Peruana de Ciclo de Vida es reconocida como una de las más importantes en Latinoamérica y con alto potencial de crecimiento, desarrollando proyectos importantes en diferentes industrias como la construcción, minería y agroindustria. El desarrollo de estos proyectos demuestra el gran nivel de adaptabilidad y amplio campo de aplicación de la metodología de ACV, que pueden ser aprovechados en el Perú.

2.2 Aplicación del ACV en proyectos de construcción

En las últimas décadas, se han presentado varias metodologías en búsqueda de la construcción sostenible (Ding, 2008). Actualmente, el ACV aplicado a la construcción es una herramienta sistemática utilizada para la evaluación de las cargas ambientales generadas en todo el sistema (Fava, 2004). Se identifican tres fases en el ciclo de vida de una construcción. La primera es la fase de pre-uso, que incluye la manufactura y la construcción. En segundo lugar, está la fase de uso que incluye la energía operativa y mantenimiento del predio. Finalmente, está la etapa de fin de vida que incluye la demolición y reutilización, reciclaje o eliminación de los desechos.

Como referencia, en el año 2005 se publicó un estudio realizado por el Ing. Zapata, donde se presenta una evaluación del inventario de un pavimento continuo de hormigón armado y de un pavimento asfáltico, enfocándose en la energía que se consume en cada uno de estos sistemas para la construcción de una carretera. Los resultados demostraron que, en el caso del pavimento de hormigón armado, la energía es consumida primero en la etapa de manufactura del cemento y del acero reforzado —un aproximado de 94% del total de energía—, desde la extracción de materia prima hasta la misma puesta del pavimento de concreto. En cuanto al pavimento asfáltico, el mayor consumo de energía se da en la fase de mezclado de asfalto y la hidratación de agregados (48%). La principal conclusión de este estudio es que en la etapa de pre-uso debe ser donde se realicen los principales cambios, ya sea en los procesos de manufactura o extracción de materia prima, para de esta forma disminuir los niveles de consumo de energía (Zapata, 2005).

En México, se publicó un proyecto en el marco de desarrollo sustentable, realizado por el Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente. En este proyecto, se realiza el Análisis de Ciclo de Vida de cuatro casos de estudio: un auditorio, un edificio habitacional, un hospital y un edificio de oficinas. El principal objetivo de este proyecto fue el de analizar los perfiles ambientales de cada una de estas edificaciones, para identificar alternativas de mejora para la disminución de impactos potenciales que genere la construcción de estas edificaciones (Centro Mario Molina, 2015).

Para la realización del proyecto desarrollado por este centro de investigación, se utilizó el estándar ISO 14040 y se empleó el método CML2000. Los impactos ambientales fueron resumidos en cuatro indicadores ambientales —acidificación, eutrofización, potencial de calentamiento global y toxicidad humana— y fueron expresados en términos de un solo contaminante —kgSO₂eq, kgPO₄eq, kg CO₂eq y kg1, 4-DCBeq, respectivamente—. Para el desarrollo de este proyecto, se utilizó el software SimaPro V.7 y la base de datos Ecoinvent V.2. Además, la conformación del inventario del ciclo de vida se realizó con datos directos de la administración de las edificaciones analizadas y, a partir de estas, se realizaron algunas estimaciones. Finalmente, la unidad funcional definida para este proyecto fue la construcción y operación de un edificio durante cincuenta años en el Valle de México.

Los resultados arrojaron que el perfil ambiental de cada tipo de edificación depende de su función; sin embargo, se pueden identificar algunas tendencias que se repiten en todos los estudios de caso. En la etapa de uso, se generan mayores impactos ambientales que en la etapa del pre-uso. Asimismo, se encontró que en la etapa de pre-uso, la estructura del edificio y los acabados son los grupos con mayores impactos potenciales; mientras que en la etapa de uso, destacan el consumo de energía eléctrica y la generación de agua residual. Por otra parte, se identificó que los materiales presentan impactos que no necesariamente están vinculados a su proporción (masa) dentro del total del edificio (Centro Mario Molina, 2015).

En la misma línea, en 2014 se realizó un estudio de Análisis de Ciclo de Vida en una vivienda unifamiliar en la ciudad de Lima. Se estimaron los impactos ambientales de este tipo de vivienda durante todas las etapas de su ciclo de vida, desde la extracción y manufactura de materiales, construcción y uso hasta el fin de vida. Los siguientes indicadores ambientales fueron definidos para este estudio: consumo de energía primaria, emisiones o desechos al suelo, uso de recursos, consumo de combustibles fósiles, potencial de calentamiento global, potencial de acidificación, criterios de salud humana, potencial de eutrofización y potencial de formación de *smog*.

De acuerdo a los resultados, dicho estudio refleja la relevancia de la etapa de uso y pre-uso —especialmente la manufactura de materiales— en el ciclo de vida de la vivienda seleccionada, sobre todo para el consumo de energía primaria, consumo de combustibles fósiles y potencial de calentamiento global. De igual forma, los otros indicadores ambientales analizados presentan mayor impacto en estas dos primeras etapas, relegando así en cantidad, mas no en importancia, a los impactos generados en la etapa de fin de vida (García, 2014).

Investigaciones realizadas por Junnila y colegas han demostrado que los impactos ambientales generados en la fase de uso son significativos, específicamente los impactos relacionados con la producción y el uso de energía. Debido a esto, se han establecido comparaciones entre métodos o procesos de construcción, que pueden ser aplicados en el rubro de la construcción para la disminución de impactos (Bartl, 2014). Además, estos estudios sirven para establecer criterios de decisión por algún método de construcción, además de indicar necesidades de mejorar ciertas prácticas o tecnologías en el sector constructivo, que ayuden a disminuir la generación de cargas ambientales.

Así, determinadas soluciones constructivas se presentan como “ecológicas” porque mejoran aspectos ambientales en determinadas etapas del ciclo de vida de los edificios, por ejemplo, en su producción. Sin embargo, cuando son analizadas de una forma más integrada y se consideran también las otras etapas del ciclo de vida, estas soluciones iniciales pierden sus ventajas en comparación a otras, debido a la cantidad de impacto que se puedan generar en las otras etapas, que inicialmente no fueron consideradas. De igual manera, productos que se presentan como baratos a mediano plazo, luego pueden tener elevados costes de mantenimiento o de gestión de residuos. Así también, productos altamente tecnológicos pueden tener altos costos productivos que no llegan a amortizarse en el tiempo. En síntesis, todas las etapas del ciclo de vida de los edificios (pre-uso, uso y fin de vida) están interrelacionadas, por lo que es fundamental aplicar la visión de ciclo de vida completa y tener en cuenta tanto los costes económicos como los ambientales a la hora de identificar las tecnologías, soluciones y productos más eficientes a ser elegidos.

En la Tabla 2.1 se resume el inicio de la aplicación de ACV en proyectos constructivos en algunos países que destacan en este rubro.

Tabla 2.1 Interés en el LCA a partir del siglo XXI

Año	País	Nº de casos	Tipo de edificación	Tiempo de vida del edificio
1996	Canadá	12	O	50
1997	Suecia	3	R	50
1998	Estados Unidos	2	R	50
1998	Japón	10	O	50
1999	Noruega	5	R	50
2000	Suecia	2	R	?
2000	Australia	2	R	100
2001	Suecia	4	R	50
2001	China	2	R	40
2001	Francia	2	R	40
2002	Suecia	1	R	50
2003	Argentina	2	S	50
2003	Estados Unidos	1	S	75
2003	India	3	R	?
2004	Finlandia	1	O	50
2004	Nueva Zelanda	3	R	100
2005	Suecia	1	R	35
2005	Suiza	-	Todos	?
2006	Estados Unidos	2	R	100
2006	Suecia	1	R	50
2007	Escocia	1	R	?
2007	Japón	2	R	35
2007	Suiza	3	R	?
2008	Israel	1	R	50
2008	Tailandia	1	O	50
2008	China	2	O	50
2009	Italia	1	R	40
2009	Italia	2	R	70
2009	Bélgica	65	R	75
2009	Bélgica	1	R	50
2009	España	1	R	50
2010	España-Colombia	2	R	50
2010	Bélgica	1	R	?
2011	Italia	2	R	?
2011	China	1	O	50
2012	Reino Unido	3	R	50
2012	Bélgica	2	R	50

R= Residencial, O= Oficinas, S= Escuelas, - = Excluidos, ?= Desconocido

Reproducción adaptada: (Fuente: Matthias Buyle, 2013, p. 380: adaptado)

CAPITULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Hipótesis

La etapa del ciclo de vida en una vivienda unifamiliar donde se generan más cargas ambientales al medio ambiente es la etapa del uso, que involucra el mantenimiento y energía operativa.

3.2 Objetivos

El estudio tiene como objetivo evaluar y cuantificar los impactos ambientales generados durante el ciclo de vida de una vivienda unifamiliar del sector B en la ciudad de Huancayo mediante el uso de un ACV.

Los objetivos específicos son:

- a. Realizar una evaluación de los impactos ambientales de una vivienda tipo B en todo el ciclo de vida.
- b. Identificar y evaluar las oportunidades para reducir los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida.
- c. Sugerir una nueva herramienta de la construcción de viviendas en el Perú, que haga frente al actual problema medioambiental.

El presente desarrollo del ACV se realizó para el caso de una vivienda unifamiliar en la ciudad de Huancayo. El sistema de vivienda es una construcción que tiene como principal objetivo brindar refugio y habitación a las personas, evitando que sean afectados por condiciones climáticas adversas, condiciones geográficas peligrosas u otro tipo de amenazas.

Para el cumplimiento del objetivo se utilizará el método de Análisis de Ciclo de Vida y un software llamado *Athena Impact Estimator*.

Un objetivo adicional de este proyecto es el de comparar dos materiales de albañilería distintos: ladrillos de arcilla frente a los de cemento y verificar cuál es el más conveniente. Asimismo, se plantea como objetivo de este proyecto determinar posibilidades concretas de introducir mejoras en el diseño de productos existentes, o en la innovación a través del diseño de nuevos productos de acuerdo a los resultados obtenidos.

La unidad funcional es un elemento clave del ACV. Es una medida de la función del sistema estudiado y da una referencia de cuáles son las entradas y salidas relacionadas. Permite la comparación entre cantidades de recursos necesarios para efectuar una misma labor o de dos sistemas diferentes. Generalmente, la unidad funcional debe ser precisa y suficientemente comparable para ser utilizada como referencia. En este proyecto, la unidad funcional designada es la vivienda construida, construcción con singularidades que serán especificadas y detalladas en el desarrollo del siguiente capítulo.

3.3 Materiales y métodos

Para el presente proyecto, se utiliza el método de ACV y, como herramienta de análisis, el *software Athena Impact Estimator*, que es uno de los más utilizados en la construcción de edificios en los estados del norte de Estados Unidos. El ACV es una metodología que permite registrar y evaluar las cargas ambientales generadas a partir de las actividades humanas al producir un producto o brindar un servicio (Red Peruana de Ciclo de Vida, 2011). Esta metodología se denomina de la cuna a la tumba, ya que se toma en cuenta desde la extracción y adquisición de la materia prima, la producción y consumo de energía, hasta la disposición final (ISO14040).

Los resultados de la aplicación de un ACV pueden tener las siguientes utilidades:

- Disponer de un sustento para la toma de decisiones
- Registrar los impactos ambientales más relevantes
- Estudiar los factores que tienen una contribución importante a los impactos ambientales

Según la norma internacional ISO 14040, un ACV es un ciclo interactivo de conocimiento y optimización que comprende las siguientes fases (Red Peruana de Ciclo de Vida, 2011):

- Determinar el objetivo y alcance del proyecto definiendo el sistema objetivo y las condiciones, así como el campo de aplicación del estudio
- Desarrollar el inventario de ciclo de vida, incluyendo los diferentes flujos de entrada y salida para los distintos procesos, mediante la elaboración de un modelo del ciclo de vida del producto o servicio
- Determinar los impactos ambientales, de forma que se comprenda la importancia ambiental de todos los flujos descritos en el modelo

- Interpretar los impactos ambientales

En cuanto al *software Athena Impact Estimator*, este fue desarrollado por *Athena Sustainable Materials Institute* en asociación con *Morrison Hefishd* y permite estimar cuantitativamente el impacto ambiental generado a lo largo del tiempo de vida de las edificaciones.

Al utilizar este *software*, se pueden evaluar y comparar fácilmente las implicancias ambientales de los diseños industriales, institucionales, comerciales y residenciales, tanto para los edificios nuevos como antiguos, cuando se realicen renovaciones importantes. De esta manera, para hallar la cantidad total de impacto, el *software* considera las siguientes actividades:

- Fabricación de materiales, incluyendo la extracción de recursos y materiales reciclados
- Transporte
- Construcción en sitio
- Las variaciones regionales en el uso de energía, el transporte y otros factores
- Tipo de inmueble y tiempo de vida útil asumido en el diseño
- Efectos de mantenimiento y de reemplazo
- Demolición y eliminación

El desarrollo de un ACV es un proceso complejo, debido a la cantidad de información que se maneja y la numerosidad de indicadores ambientales que pueden usarse para su determinación. Sin embargo, el *software* utilizado en este proyecto ha sido diseñado para facilitar la aplicación de esta metodología y que se puedan obtener resultados de fácil interpretación para el usuario. Dentro de los indicadores ambientales que el *software* toma en cuenta, se pueden mencionar los siguientes:

1. Cuantificación de energía primaria
2. Potencial de calentamiento global
3. Potencial de acidificación marina
4. Efecto potencial sobre la salud respiratoria humana
5. Potencial de agotamiento del ozono
6. Potencial *smog* fotoquímico
7. Potencial de eutrofización
8. Consumo de combustibles fósiles

El primer indicador es la cuantificación de energía primaria, que es la energía disponible en la naturaleza antes de ser convertida o transformada. El *software* define como energía primaria a toda energía involucrada en cualquier actividad del proceso del ciclo de vida. Este estimador de impacto captura el uso indirecto de la energía que interviene en los procedimientos, transporte, conversión y entrega del combustible (García, 2014). Para la cuantificación de la energía primaria, considera lo siguiente:

- Energía debido al consumo de combustibles fósiles no renovables
- Energía nuclear no renovable
- Energía renovable (sol, viento, agua)
- Energía geotérmica
- Biomasa renovable
- Uso de fósiles como materia prima
- Uso de biomasa como materia prima

El segundo indicador ambiental es el potencial de calentamiento global. Para este indicador, el dióxido de carbono es el principal factor, ya que es un estándar de referencia común para los gases de efecto invernadero. Esto es debido a que es el gas con mayor relevancia y responsabilidad del calentamiento global (Masters, 2008). El resto de gases de efecto invernadero tienen un efecto de equivalencia de CO₂, que es un valor del potencial de efecto invernadero. Este efecto de equivalencia tiene un horizonte de tiempo debido a la reactividad atmosférica o la estabilidad de los diversos gases. Este horizonte puede variar entre 20, 100 o 500 años, siendo el de 100 el más utilizado. El método de CO₂ equivalente será descrito a continuación (véase Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Valores equivalente de emisión de gases evaluado en 100 años

SUSTANCIA QUÍMICA	CO ₂ equiv.
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	25
Óxido Nitroso (N ₂ O)	267

A partir de la Tabla 3.1, se define que para la cuantificación de resultados se debe de aplicar la siguiente igualdad:

$$\text{CO}_2 - \text{Equiv. En Kg} = \text{CO}_2 \text{ kg} + (\text{CH}_4 \text{ kg} * 25) + (\text{N}_2\text{O} * 267)$$

Ecuación 3.1 Dióxido de Carbono Equivalente

Como el *software* estimador de impacto trabaja con una cantidad de datos que han sido desarrollados con el enfoque del ciclo de vida, los procesos que consideran emisiones de gases efecto invernadero se incluyen en los resultados del potencial de calentamiento global.

El tercer indicador ambiental es el potencial de acidificación marina, que son las consecuencias ambientales que sufren los océanos tras la presencia de cambios climáticos. La principal consecuencia es el descenso del pH de los océanos, que es causado principalmente por la absorción de dióxido de carbono antropogénico desde la atmósfera. Cuando el CO_2 se disuelve en el agua de mar, la mayor parte de él se convierte en ácido carbónico (H_2CO_3), posteriormente este se ioniza en hidrógeno y bicarbonato. De la misma manera, estos iones de bicarbonato se vuelven a ionizar y todas estas reacciones, en las cuales son liberados iones de hidrógeno, acidifican el agua y finalmente el descenso del pH termina siendo la causa de alteraciones en el sistema marino (IPCC, 2013). Actualmente, el pH de la superficie del océano ha caído 0,1 unidades. Producto de este descenso se da un incremento del 30% en la acidez. Además, se estima que para finales de este siglo, si las cantidades de emisiones actuales continúan, el pH podría caer otras 0,3 unidades, lo cual significaría un aumento de acidez de casi el 100% en la superficie del océano (Raven, 2005).

El cuarto indicador ambiental son los efectos sobre la salud humana. Las partículas en suspensión son producto de las emisiones de agentes contaminantes en la atmósfera y afectan a la salud. En este grupo, se encuentran las partículas consideradas más pequeñas y finas que tienen una dimensión de $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) y las partículas que tienen una dimensión que se encuentra en el rango de $2,5 \mu\text{m}$ a $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}). Estas partículas son las causantes, a corto plazo, de la contaminación atmosférica y sus efectos negativos sobre la salud. Los efectos nocivos van desde un aumento de la mortalidad total por causas respiratorias y cardiovasculares, hasta las alteraciones del funcionalismo pulmonar y otros síntomas (Ballester, 2005).

El quinto indicador ambiental es el agotamiento de capa de ozono, que está levemente relacionado con el problema del efecto invernadero. Como se sabe, el ozono en grandes cantidades en la atmósfera se convierte en un escudo que nos protege de la radiación ultravioleta, la cual proviene del Sol, y de esta manera hace posible la vida en la Tierra. Sin embargo, el consumo de ciertas sustancias que contienen como principales

productos el cloro, bromo o flúor están provocando el agotamiento de la capa de ozono. Este es el caso de los clorofluorocarbonos (CFC), que son los productos que constituyen el primer causante del deterioro de la capa de ozono, debido a que tienen una larga permanencia en la atmósfera y no se eliminan en la tropósfera (Martínez & Fernández, 2004). Estos componentes son expuestos a la radiación ultravioleta en la estratosfera y aquí se produce la liberación del cloro, sustancia tóxica. Este agotamiento de la capa de ozono es menor cerca del ecuador y se incrementa con la latitud cerca a los polos. Por ejemplo, en el caso de Latinoamérica sus efectos más importantes se observan en países como Argentina, Chile, Brasil y Uruguay (WMO, 2007). Cada sustancia que contribuye con el agotamiento de ozono se caracteriza con el indicador final de impacto ambiental de masa en kilogramos equivalente a CFC-11 (Masters, 2008).

El sexto indicador es el potencial de formación de *smog* fotoquímico. Bajo ciertas condiciones climáticas, las emisiones atmosféricas industriales y también las que son producidas por el transporte, pueden ser atrapadas en la superficie. Estas emisiones, en presencia de la luz solar, producen como resultado el *smog* fotoquímico, un síntoma de formación fotoquímica de ozono (POCP). Aunque el ozono no es emitido directamente, es un producto de interacciones de compuestos orgánicos volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno (NO_x). Asimismo, la reacción del ozono y el oxígeno con hidrocarburos producen radicales libres; y la reacción de estos radicales libres primarios entre sí, producen otros contaminantes fotoquímicos igual o más peligrosos para la salud. Las lesiones que pueden llegar a provocar son afecciones asmáticas o broncopulmonares y las lesiones foliares que se originan en la vegetación. Los resultados del indicador de contaminación son expresados en masa de base O_3 equivalente (Masters, 2008).

El séptimo indicador ambiental es el potencial de eutrofización acuática. La eutrofización es una forma de contaminación que sufren las aguas debido a una cuantiosa contribución de nutrientes, también a la acelerada productividad biológica (crecimiento de algas y malezas) y una acumulación indeseable de la biomasa de algas (US Agencia de Protección Ambiental, 2008). Un aumento de las algas en los ecosistemas acuáticos produce una disminución del contenido de oxígeno, debido a que la proliferación y descomposición de dicha biomasa consume este elemento medido como DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno).

Los dos elementos con mayor relevancia causantes de la eutrofización son el fósforo y el nitrógeno, que están presentes en la composición de los fertilizantes utilizados en la

agroindustria. Pese a que la mayoría de los fertilizantes, cuando son utilizados correctamente, proporcionan los beneficios para los que fueron adquiridos, su eficiencia también depende de la pendiente de los campos, la precipitación y su volatilización. Algunos de estos productos pueden salirse de los límites originalmente previstos y causar consecuencias no deseadas en aguas próximas (Moreno & Quintero, 2010). Generalmente, los cálculos numéricos de los impactos en este indicador se expresan en kilogramos de PO_4 -equivalente.

La metodología para obtener el índice de eutrofización es el siguiente:

$$Ei = \sum_i EP_i \times m_i$$

Ecuación 3.2 Índice de eutrofización

Donde m_i es la masa equivalente en kg de la sustancia emitida al agua. El total se expresará como kg de PO_4^{-3} . El cálculo del Potencial de Eutrofización (EP, por sus siglas en inglés) se realiza de la forma siguiente:

$$EP = \frac{\frac{v_i}{M_i} \times \frac{N_{O_2}}{A_e}}{\frac{1}{M_{PO_4^{3-}}} \times \frac{N_{O_2}}{A_p}}$$

Ecuación 3.3 Potencial de Eutrofización

Donde v_i es el número de moles de N o P de una molécula del compuesto i , M es la masa molecular (kg/mol), N_{O_2} es el número de moles de O_2 consumidos durante la degradación de las algas, A_e es el número de moles N o P contenidos en una molécula de algas. Se toma la composición del alga *Redfield* $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$, asumiéndose esta como la composición media de los organismos acuáticos (Guineé, Marieke, Huppés, & Van Oers, 2001).

Finalmente, el octavo indicador es el consumo de combustibles fósiles. Los combustibles fósiles son originados de forma natural a través de procesos biogeoquímicos bastante complejos, procedimientos que se extienden gran cantidad de años. Entre los combustibles fósiles más representativos se encuentran el carbón, el petróleo y el gas natural. El consumo de estos combustibles fósiles genera la emisión de CO_2 y son causantes de la mayor parte del incremento de su concentración atmosférica (Houghton et al., 2000; IPCC, 2007; Environment Canada, 2008). Asimismo, otro atenuante de la emisión de este gas es la tala forestal, quema de biomasa y otros

procesos no energéticos, como la producción de cemento. De los gases de efecto invernadero (GEI), el CO₂ es considerado el más importante, ya que se caracteriza por tener una elevada persistencia en la atmósfera que varía entre los 5 a 200 años, y es el gas que se emite en mayor proporción (IPCC, 2013).

El *software* utilizado para el desarrollo de este proyecto, *Athena Impact Estimator*, está caracterizado según cada región donde se haya desarrollado el proyecto de construcción, es decir, se adecúa a las características de cada zona considerando factores como medios de transporte, distancias o redes de abastecimiento eléctrico. Además, la tecnología requerida para la manufactura de materiales es tecnología aplicada de acuerdo al lugar de construcción de la vivienda y los procedimientos necesarios para esta.

Cabe mencionar que los datos de entrada, como el tiempo de servicio de la vivienda o tipo de edificación, resultan ser factores influyentes en los resultados finales, ya que el *software* también diferencia estos aspectos para la utilización de su inventario de base de datos. Asimismo, el programa realiza comparaciones entre la energía operativa y la energía incorporada durante el ciclo de vida de la vivienda. De esta manera, brinda al usuario la capacidad de comprender mejor los cambios que se producen al aplicar reducciones en la parte de uso de energía para el funcionamiento (ATHENA, 2003).

El *software* utiliza un factor de caracterización denominado TRACI's "Human Health Particulates from Mobile Sources" (ATHENA, 2003). Esta herramienta fue desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) y es usada para la reducción y evaluación química de otros impactos ambientales, con el fin de ayudar en la evaluación de impacto al ACV, la industria ecológica, proceso de diseño y la prevención de contaminación. Para el desarrollo de este factor, fueron seleccionadas varias categorías de impacto, se revisaron varias metodologías y se priorizó algunas categorías para futuras investigaciones.

Además, durante la fase de investigación de la metodología utilizada para la selección de categorías de impacto ambiental, era importante la coherencia que tuviera con las hipótesis de modelado desarrollados en proyectos anteriores por la EPA. Por ejemplo, la categoría de salud humana se basa en gran medida a las hipótesis formuladas en el estudio denominado *EPA Risk Assessment Guidance for Superfund and EPA's Exposure Factors Handbook*. Sin embargo, algunas categorías, como la formación de la acidificación y el *smog*, se detallan en base a modelos empíricos norteamericanos.

Asimismo, cuando no había estudios precedentes de la EPA, los supuestos y las elecciones de valor fueron minimizados por el uso del método de los puntos medios (EPA, 2012).

El diseño modular de TRACI permite la recopilación de las metodologías de evaluación de impactos más sofisticados que se pueden utilizar en el *software* desarrollado para la computadora. Cuando no se aplicaron metodologías sofisticadas, la investigación se llevó a cabo mediante el uso de diversas simulaciones para determinar los factores de caracterización más apropiados, para representar las diversas condiciones en los Estados Unidos.

El inventario de ciclo de vida (LCI, por sus siglas en inglés) que utiliza el programa ha sido desarrollado por el propio Instituto Athena, basado en proyectos anteriores propios. Desde el inicio de sus labores, este instituto lleva a cabo la investigación del ciclo de vida, mediante el desarrollo de un conjunto cada vez mayor de datos cualitativos, ICV's comparables y bases de datos de materiales y productos de construcción. De esta manera, la mayor parte de las investigaciones en Athena son enfocadas para el desarrollo, verificación y actualización de las bases de datos, que conforman el soporte de las herramientas de *software* Athena. Como resultado, actualmente este *software* proporciona a los usuarios un alto nivel de detalle y especificidad en sus resultados (ATHENA, 2003).

Además, en este ICV no solo se encuentran datos para los materiales y productos de construcción, sino también para los procesos de uso de energía, transporte, construcción y demolición. Asimismo, se incluye la construcción, el mantenimiento, la reparación y efectos de reemplazo a través del tiempo de funcionamiento, y la demolición y eliminación.

Sin embargo, uno de los mayores limitantes de la base de datos Athena es su sensibilidad regional, ya que toma en cuenta la tecnología de fabricación, el transporte y las diferencias de la red eléctrica, así como las diferencias de contenido reciclado de los productos manufacturados que varía de acuerdo al lugar donde se realice el estudio. Estas bases de datos de Athena se construyen desde cero, utilizando modelos de procesos de ingeniería y no son dependientes de las fuentes de datos comerciales o gubernamentales.

Por otra parte, las estimaciones de impacto producido se obtienen a partir del inventario de ciclo de vida. En este caso, la evaluación se considera desde el inicio hasta el fin de vida de toda la construcción. Los resultados de esta evaluación se cuantifican de

acuerdo a los indicadores ambientales que se haya considerado para el proyecto. Además, el programa requiere datos característicos propios de cada proyecto, como la carga viva atribuida a la vivienda o la cantidad y dimensiones de los elementos estructurales que la componen, además de los detalles de arquitectura y tipo de materiales utilizados para su construcción. Finalmente, gracias a la recopilación e introducción de toda esta información, se pueden cuantificar los impactos a nivel de cada indicador ambiental.



CAPITULO 4 CASO DE ESTUDIO

4.1 Alcances y limitaciones del proyecto

El presente proyecto de ACV ha sido desarrollado en búsqueda de herramientas innovadoras que se puedan utilizar para estimar los impactos ambientales que genera la construcción en nuestro país. Por ello, se eligió la ciudad de Huancayo por su potencial crecimiento en el rubro de la construcción. El tipo de vivienda elegida para el desarrollo de este proyecto es una unifamiliar del tipo B y tiene un área de 130 m². El sistema de vivienda es una construcción que tiene por finalidad la protección y refugio de las personas que viven dentro de ella. Esta protección es contra los rigores del clima y desastres naturales que puedan acontecer (García, 2014).

Los límites o fronteras del sistema consideran las fases de procedimientos unitarios y el nivel de detalle, que se incluyen en el análisis. Además, definen aquellos procesos unitarios que se incluyen en el sistema que será evaluado (Red Peruana de Ciclo de Vida, 2013). El presente proyecto tomó en cuenta los impactos ambientales que se generan en todo el ciclo de vida de la vivienda, considerando una vida útil de 50 años, en la cual se incluyen las etapas de pre-uso, uso y fin de vida.

En relación a la etapa de pre-uso, se incluyen dentro del sistema la manufactura y construcción de materiales utilizados en esta fase. Respecto a la fase del uso, se consideran el mantenimiento y el gasto de energía operativa. Finalmente, para la etapa de fin de vida, se consideran el análisis de los impactos y la disposición final de los recursos empleados.

Sin embargo, para el sistema evaluado, el *software* no considera la fabricación de maquinarias ni la producción de camiones utilizados para la construcción, así como tampoco considera los equipos de protección individuales (casco, guantes, lentes, zapatos de seguridad, traje de seguridad, arneses, etc.) o colectivos (andamios, líneas de vida, plataformas, etc.) utilizados por los obreros. Asimismo, no se tomaron en cuenta las vías exteriores que también forman parte de la edificación, como son las veredas, áreas verdes o jardines y estacionamientos externos, es decir, ubicados en la calle (García, 2014).

Los límites geográficos del ACV realizado abarcan solamente casos de viviendas en la ciudad de Huancayo, específicamente viviendas de nivel socioeconómico B. Para la recopilación de información de entrada introducida al *software*, se obtuvieron datos

reales de consumo de electricidad anual de la empresa Electrocentro. En el caso de la conexión domiciliar de gas natural, aún no se cuenta con este servicio en la ciudad donde se está realizando el estudio. Por ello, se realizó una aproximación en términos de consumo anual promedio en el Perú y se utilizó este dato.

El horizonte temporal utilizado para este proyecto comprende desde el año 2012 (datos de la matriz energética) hasta el año 2015. No obstante, se ha utilizado información más antigua, recopilada de investigaciones y estudios anteriores. Es importante mencionar también las diferencias en desarrollo tecnológico que se tienen en los distintos estudios que se han consultado. En ese sentido, se han tomado los cuidados de documentación necesarios para evitar fallas de interpretación.

Además, cabe mencionar que dentro del desarrollo del proyecto se han encontrado varias limitaciones que serán mencionadas a continuación:

- El *software* utilizado para el desarrollo de este proyecto está regionalizado, para algunos estados del norte de los Estados Unidos y provincias de Canadá. Las matrices energéticas de estos lugares son diferentes y mayores en consumo y generación de energía al del Perú. Teniendo en cuenta este factor, se eligió al que porcentualmente se asemeja al peruano, en base a los recursos utilizados para la generación de energía eléctrica.
- Dentro de los diseños que se deben realizar en el *software*, para definir las dimensiones de las vigas y columnas, estas están asumidas en base a la norma de construcción canadiense y a la experiencia de las personas involucradas en el desarrollo del *software*.
- El inventario de ciclo de vida utilizado por el *software* para los diferentes productos y materiales utilizados en el proyecto, ha sido desarrollado para los estados mencionados anteriormente. Esta base de datos tiene sensibilidad regional, es decir, varía de un estado a otro, tomando en consideración la tecnología de manufactura, transporte y las diferencias de redes eléctricas que pueden variar significativamente de una región a otra.
- Las resistencias de los elementos estructurales y características de diseño son diferentes a los de la norma peruana.

- El consumo de energía en el tiempo de vida para este estudio se basa en datos históricos, aun cuando el comportamiento humano y el diseño puede afectar también la energía utilizada y causar variación en los resultados.

4.2 Datos necesarios de la vivienda y requisitos de los mismos

Los datos fueron recolectados específicamente del proyecto del que se está evaluando el ACV. Por ello, para la obtención de los mismos se tomaron en cuenta las características arquitectónicas y estructurales del proyecto de construcción.

Para el presente proyecto, estos datos utilizados han servido para validar la información recopilada a partir de toda la bibliografía revisada para el desarrollo de la tesis.

Para los procesos en los cuales no se consiguieron datos de fuentes primarias, se ha recurrido a datos de fuentes secundarias.

4.3 Etapas del ciclo de vida

El *software* Athena considera el impacto ambiental para las siguientes etapas en el ciclo de vida de una vivienda:

- Pre-uso: comprende la manufactura de materiales y la construcción. La manufactura incluye a su vez la extracción de materia prima, material reciclado y el transporte.
- Uso: comprende las sub-etapas de mantenimiento y energía operativa.
- Fin de vida: comprende las sub-etapas de demolición y eliminación de materiales.



Figura 4.1 Etapas del análisis de ciclo de vida

Fuente: Elaboración propia a partir de Samy García
 (Evaluación Ambiental durante el Ciclo de Vida de una Vivienda Unifamiliar)

4.4 Definición del sistema

Para el desarrollo del presente proyecto, se evalúa un tipo de vivienda que cumple con las características de una vivienda unifamiliar de nivel socioeconómico B, que no presenta diseño estructural ni acabados. Por ello, se tomó como caso de estudio una vivienda ya existente de 130 m² (véase Figuras 4.2, 4.3, 4.4).

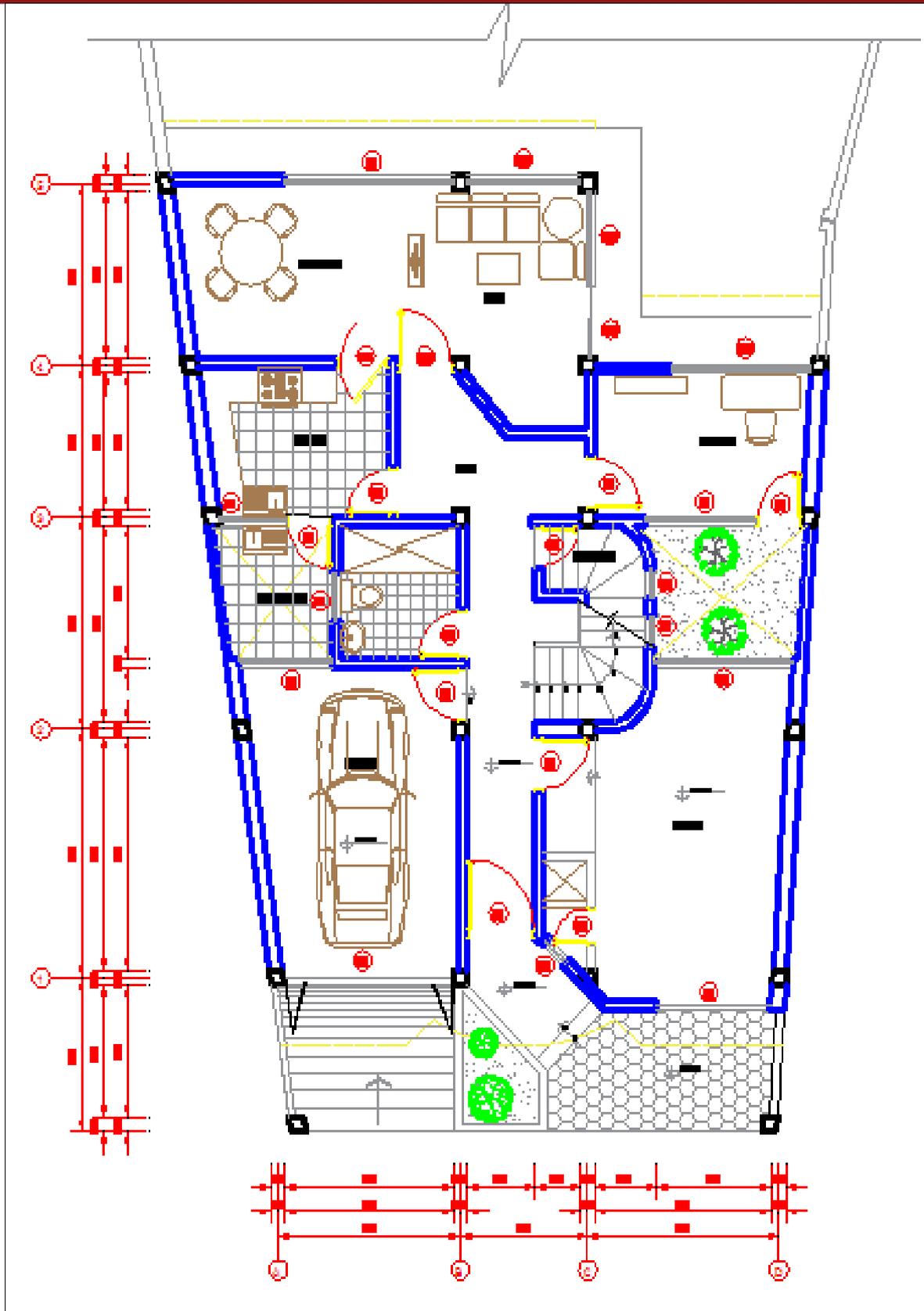


Figura 4.2 Plano de arquitectura de la primera planta

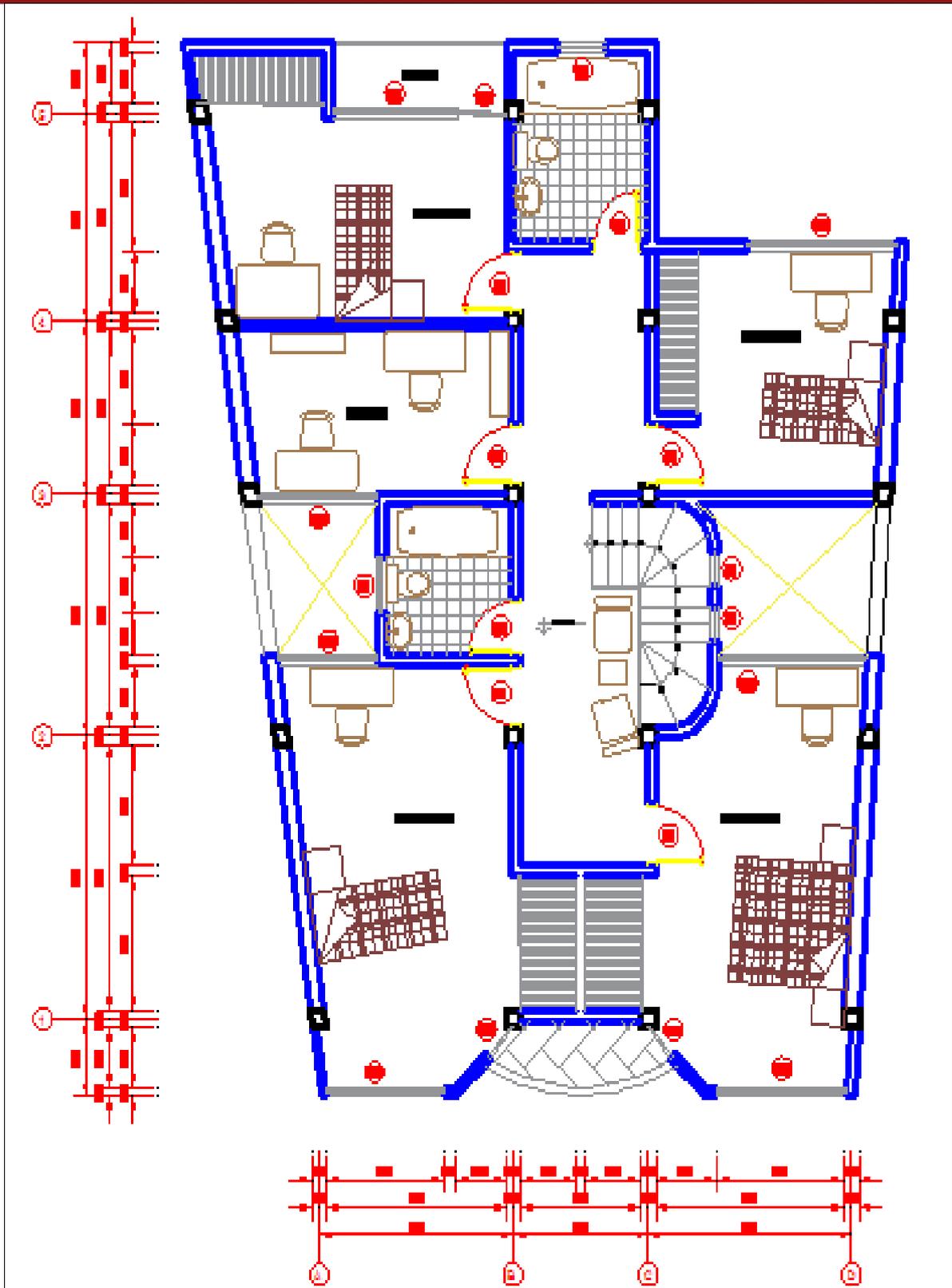


Figura 4.3 Plano de arquitectura de la segunda planta

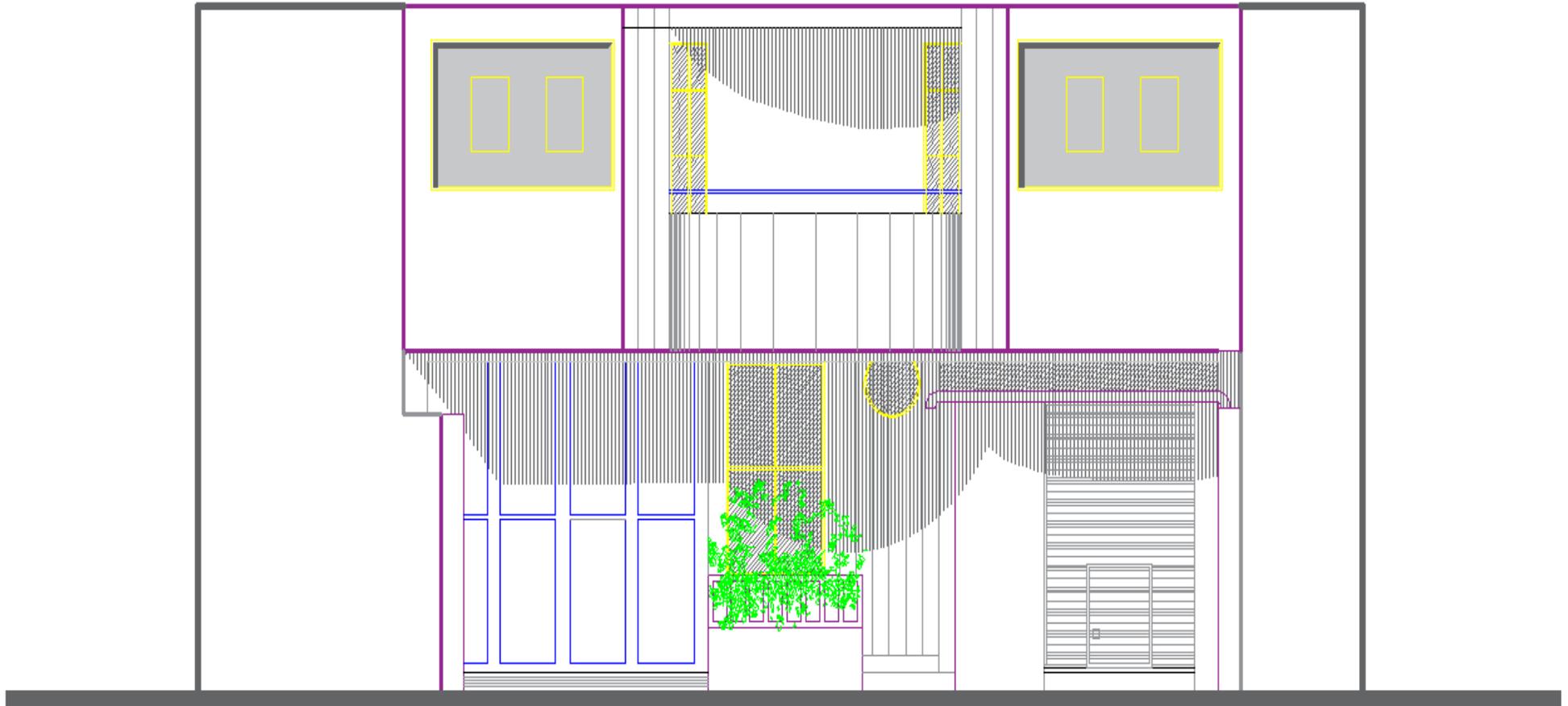


Figura 4.4 Elevación principal de la vivienda

La vivienda está localizada en el distrito de San Antonio, provincia de Huancayo, en la región Junín. El término de su construcción fue en el año 2012. La construcción de la vivienda colindante fue concluida hace seis años; y la universidad a espaldas del proyecto, hace dos años aproximadamente. El tiempo de vida estimada de la construcción evaluada en este proyecto es de 50 años.



Figura 4.5 Ubicación geográfica de proyecto estudiado

Fuente: Google Earth, 2014

La vivienda fue diseñada únicamente por un arquitecto, y la construcción fue realizada por un maestro de obra y una cuadrilla de siete obreros. Está diseñada en dos plantas y ambas están unidas por una sola escalera, como se aprecia en los planos de planta. En la primera planta, se puede encontrar la siguiente distribución de espacio: garaje, tienda, depósito, servicios higiénicos, cocina, hall, estudio, comedor y sala. Asimismo, en la segunda planta, hay cuatro dormitorios, dos servicios higiénicos y un estudio. Además, en las zonas exteriores hay un jardín y acera de entrada.

Para la construcción de esta vivienda, en primer lugar se tuvo que realizar la excavación y luego el movimiento de tierras. La altura del terreno que se alcanzó con las excavaciones fue de 1.0 m, para las zapatas y los cimientos corridos. Luego, se realizó

la construcción de las cimentaciones con concreto de resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. De acuerdo a los planos, la vivienda es un sistema tradicional aporticado sin placas dual tipo I. Las columnas tienen dimensiones de $0.25 \times 0.25 \text{ m}$ y las vigas tienen dimensiones de $0.30 \times 0.60 \text{ m}$. Para este proyecto, los techos de ambos pisos son aligerados de diseño tradicional a 40 cm entre viguetas y una altura de 18 cm . El concreto armado utilizado para el vaciado de las estructuras tiene una resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y fueron preparados *in situ*. Los recubrimientos de las estructuras fueron de 5 cm en las vigas, 4 cm en columnas y de 2 cm en la losa aligerada.

Para la descripción de fachadas de las paredes vecinas, se han utilizado ladrillos de concreto tarrajeados con mortero de arena fina y cemento. Para la fachada, se utilizaron muros de ladrillo de concreto que fueron tarrajeados y pintados con pintura látex. Además, para el diseño de los interiores, se utilizó pintura látex y los pisos tienen acabados en cerámica. Además, las puertas utilizadas son de madera sólida y las ventanas son de vidrio con un marco de aluminio común.

Para el caso de las instalaciones eléctricas y sanitarias, se toman en cuenta los diseños comunes para una vivienda unifamiliar (una caja de registro, un tablero general, etc.). El consumo de electricidad anual fue verificado en 2640 kWh por año; y para el caso de consumo de gas natural, este fue estimado en 180 m^3 para el mismo periodo de tiempo (Cálidda, Electrocentro, 2014).

Finalmente, el tiempo de construcción del proyecto fue de 14 meses, debido al poco personal a cargo del maestro de obra.

4.5 Elección de matriz energética

Como se mencionó anteriormente, una de las principales limitaciones para el uso de este *software* es que está diseñado para ciudades del norte de Estados Unidos y algunas provincias Canadienses. Por ello, al momento de iniciar el diseño del proyecto en el *software* es necesaria la previa identificación de una alternativa que tenga la matriz energética similar, en proporciones, a la de nuestro país. Con este fin, se realizaron algunas figuras y tablas comparativas para la elección de la ciudad en la que teóricamente se situará el proyecto.

Para iniciar el análisis, se presenta la matriz energética del Perú para el año 2012, en el que se muestran las principales fuentes para la generación de energía eléctrica en el país (Figura 4.6).

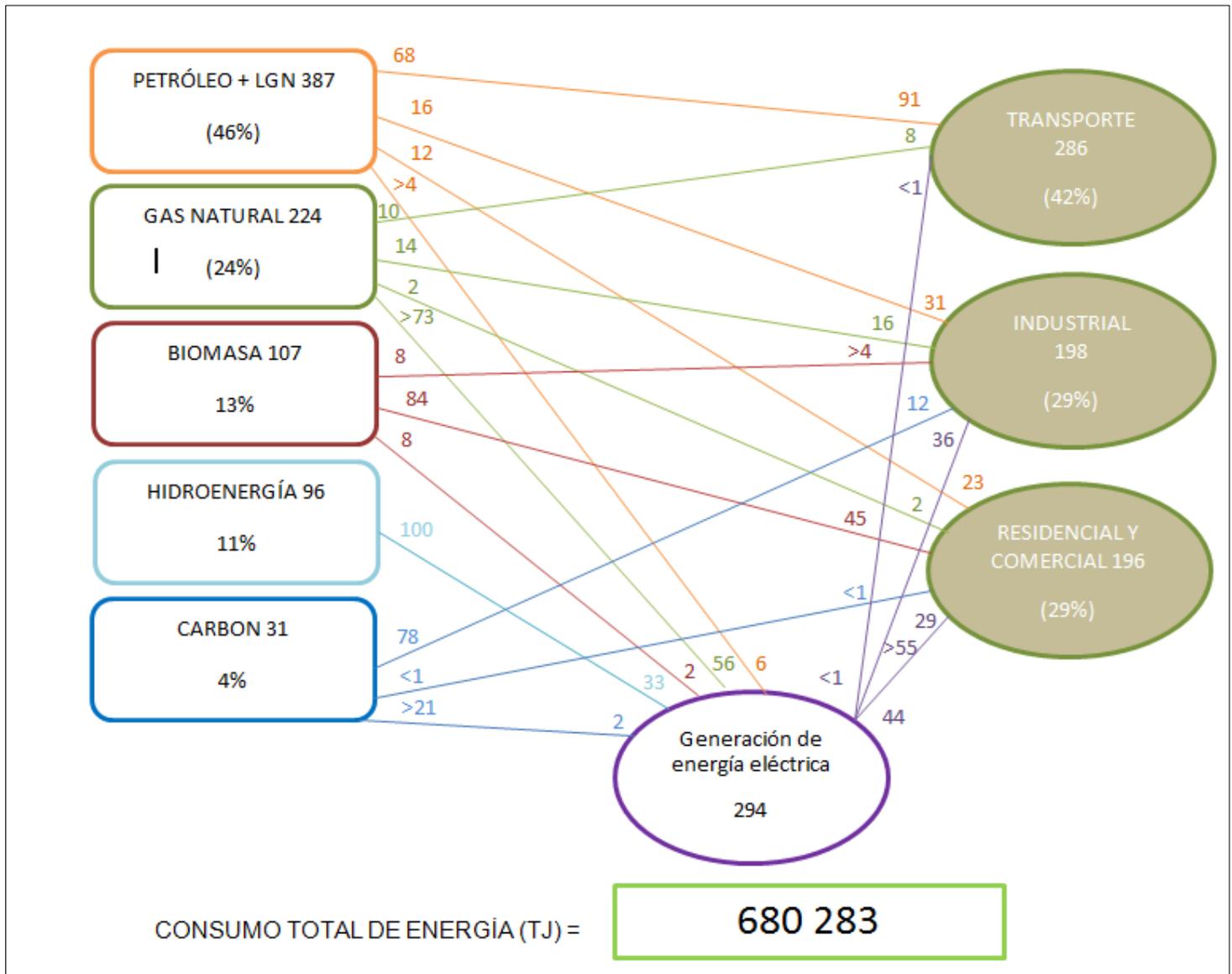


Figura 4.6 Matriz Energética del Perú 2012

Fuente: Adaptado del Ministerio de Energía y Minas, 2012

En la Figura 4.6, se puede apreciar que el gas natural y la hidroenergía son las principales fuentes de generación de energía eléctrica. El gas natural tiene una presencia de 56%, superando el 41% del aporte en el 2009. Por otro lado, la hidroenergía tiene el 33% de presencia, respecto al 41% que tenía en el 2009. Además, se puede mencionar al petróleo con el 6%, y la biomasa y carbón natural, ambos con el 2% de aporte. Lo mencionado anteriormente se puede resumir en la Figura 4.7 que servirá para comparar las matrices de estados norteamericanos presentados más adelante.

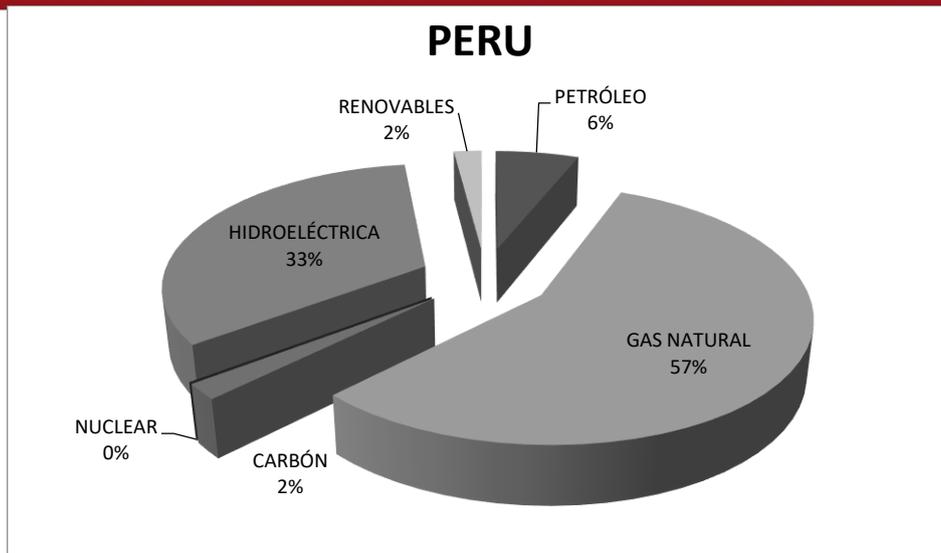


Figura 4.7 Fuentes de energía primaria en el Perú para la producción de electricidad

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Energía y Minas

Asimismo, se define la ausencia de energía nuclear como fuente de energía primaria en nuestro país. Por ello, las provincias canadienses que están dentro del *software* como opción son descartadas inicialmente. Sin embargo, para los estados de Estados Unidos se realizó un análisis minucioso de la matriz energética y sus fuentes para la producción de energía eléctrica.

Tabla 4.1 Matriz energética de estados norteamericanos

ESTADOS NORTEAMERICANOS	FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA					
	PETRÓLEO (GWh)	GAS NATURAL (GWh)	CARBÓN (GWh)	NUCLEAR (GWh)	HIDROELÉCTRICA (GWh)	RENOVABLES (GWh)
GEORGIA	48	3812	3678	2343	231	314
CALIFORNIA	0	6617	31	1526	884	3062
MINNESOTA	0	483	2416	997	53	941
NEW YORK	1170	3542	562	3480	1833	522
FLORIDA	65	10429	3161	2352	0	390
PENNSYLVANIA	299	3641	7348	6549	112	502
OREGON	0	484	3963	0	0	532
WASHINGTON	0	261	0	755	8163	621

Fuente: Adaptado de U.S. Energy Information Administration (State Profile and Energy Estimates)

A continuación, a partir de la Tabla 4.1, se muestran las figuras de fuentes de energía primaria para cada uno de estos estados. Las figuras mostrarán la incidencia de estas fuentes en la generación de energía en términos porcentuales. De esta forma se podrá realizar una mejor comparación con la figura de la matriz peruana.

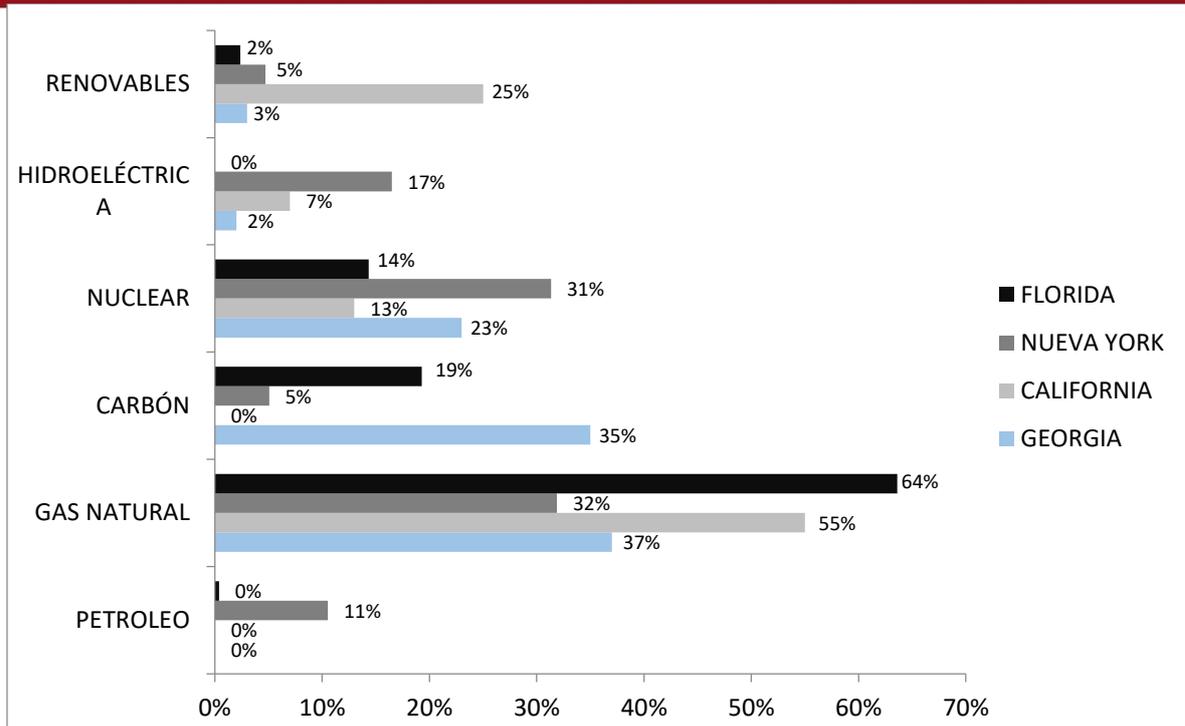


Figura 4.8 Fuentes de energía primaria en los estados de Florida, Nueva York, California y Georgia

Fuente: Elaboración propia con datos de U.S. Energy Information Administration (State Profile and Energy Estimates 2015)

Se analizó solo cuatro estados norteamericanos, debido a que los valores del resto distaban mucho de los datos de la matriz de energía peruana, sobre todo por el uso de energía nuclear para la generación de energía eléctrica. Los cuatro estados en cuestión son Georgia, California, Nueva York y Florida.

Luego de un análisis comparativo, se puede evidenciar que los porcentajes de incidencia de las fuentes de energía para la generación de energía eléctrica del estado de California son los que más se asemejan a la realidad peruana. En la Figura 4.9, se aprecia la comparación entre dicho estado y el Perú. A partir de estos resultados, se obtuvo como resultado que la matriz energética que más se asemeja porcentualmente —en términos numéricos es muy superior— al Perú es el estado de California, pese a que numéricamente en ninguna de las fuentes de energía los datos son iguales.

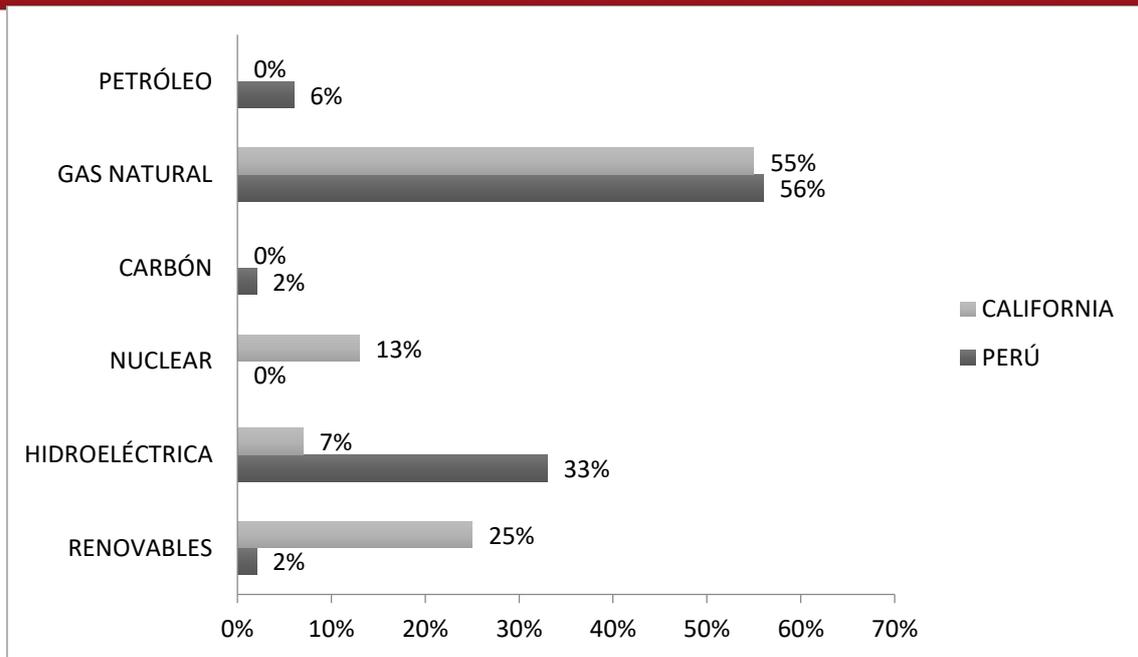


Figura 4.9 Comparación de fuentes de energía eléctrica

Fuente: Elaboración propia con datos de U.S. Energy Information Administration (State Profile and Energy Estimates 2015) y del INEI

Entre las fuentes con mayor parecido entre el Perú y el estado de California, se encuentra gas natural, que es la más significativa para ambos con casi el 55% de participación. Asimismo, el carbón para ambos no representa una forma de energía considerable, limitándose a menos del 5 % de participación. Además, el petróleo en el Perú tiene incidencia baja y en ese estado su incidencia es nula. Sin embargo, las mayores diferencias se dan porque la hidroenergía no representa una fuente importante de generación de energía eléctrica. Además, la energía nuclear en este estado tiene una incidencia relativamente importante (14%), siendo contrario en el Perú donde el aporte de esta fuente es nulo. Por otra parte, los recursos renovables también representan una fuente de energía medianamente importante en California, todo lo contrario en el Perú donde su aporte no es significativo (2%).

Estas fueron las principales razones por las que se eligió la matriz energética del estado de California y en el *software* se trabajará como localización con Los Ángeles, que es una de las principales ciudades de este estado.

CAPITULO 5 RESULTADOS

En el presente capítulo, se mostrarán los resultados del diseño en el *software Athena Impact Estimator* de la vivienda tipo B ubicada en la ciudad de Huancayo. Con este fin, se utilizan tablas y figuras para la presentación de estos resultados.

5.1 Evaluación de cargas ambientales generadas

Las figuras 5.1 – 5.16 a continuación mostradas, contienen la cuantificación de los niveles de impacto en las etapas de pre-uso, uso (considerando 50 años de vida útil de la vivienda) y fin de vida para cada indicador ambiental definido. Así también, muestran gráficamente las diferencias cuantitativas entre etapas.

Los indicadores ambientales analizados son consumo de energía primaria, potencial de calentamiento global, potencial de acidificación marina, potencial de efecto sobre la salud humana, potencial de eutrofización, potencial de agotamiento de ozono, potencial de formación de *smog* y consumo de combustibles fósiles.

La Tabla 5.1 muestra los elementos que han sido utilizados para el diseño de este proyecto y la Tabla 5.2 muestra las cantidades de impacto generado por estos materiales en cada etapa del ciclo de vida de la vivienda.

Tabla 5.1 Elementos empleados en el proyecto de vivienda unifamiliar

Elementos	Unidad	Total	Columnas y vigas	Pisos	Fundaciones	Techos	Muros	Materiales extra	Valor de masa	Unidad de masa
Acero laminado en frío	ton	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	ton
Acero galvanizado	ton	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	ton
Bloque de Concreto 8"	bloques	4414.8	0.0	0.0	0.0	0.0	4414.8	0.0	83.9	ton
Bloque de concreto	m2	302.5	0.0	0.0	0.0	0.0	302.5	0.0	69.6	ton
Clavos	ton	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	ton
Concreto 20 MPa (ceniza volante promedio)	m3	80.9	0.0	0.0	39.0	13.7	0.0	28.3	188.2	ton
Concreto 30 MPa (ceniza volante promedio)	m3	22.9	22.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	53.3	ton
Concreto premezclado	m3	24.4	0.0	0.0	0.0	24.4	0.0	0.0	59.7	ton
Cristales	ton	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	ton
Madera blanda pequeña, seca en horno	m3	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0	1.0	ton
Mallas soldadas / línea de escalera	ton	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.4	ton
Marco de ventana de madera revestido de aluminio	kg	440.5	0.0	0.0	0.0	0.0	440.5	0.0	0.4	ton
Marco de ventana de aluminio	kg	15.1	0.0	0.0	0.0	0.0	15.1	0.0	0.0	ton
Marco de ventana de fibra de vidrio	kg	43.7	0.0	0.0	0.0	0.0	43.7	0.0	0.0	ton
Mortero	m3	92.0	0.0	0.0	0.0	0.0	92.0	0.0	117.8	ton
Pintura látex en base a agua	L	348.8	0.0	0.0	0.0	0.0	348.8	0.0	0.3	ton
Poliestireno expandido	m2 (25mm)	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	ton
Refuerzo, varillas, perfiles ligeros	ton	21.2	6.4	0.0	0.8	0.9	12.9	0.3	21.2	ton
Solvente a base de pintura de resina	L	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	ton

Tabla 5.2 Resultado de cargas ambientales para cada etapa del ciclo de vida

INDICADOR AMBIENTAL	UNIDAD	ETAPA DE CICLO DE VIDA					TOTAL
		PRE-USO		USO		FIN DE VIDA	
		Manufactura	Construcción	Mantenimiento	Energía operativa	Fin de vida	
Energía Primaria	MJ	1 060 000	304 000	39 030	1 830 000	91 800	3 324 830
Potencial de calentamiento global	kg CO ₂ equiv.	101 710	24 914	2 123	99 500	6 545	234 792
Potencial de acidificación marina	kg SO ₂ equiv.	474	246	16.88	758	71.9	1 567
Potencial de efecto sobre la salud	kg PM _{2,5} equiv.	263	24	9	54	4	355
Potencial de eutrofización	kg N equiv.	13.83	16	8	7	5	50
Potencial de agotamiento de ozono	kg CFC-11 equiv.	6.62E-04	4.76E-05	2.16E-05	1.99E-07	2.51E-07	7.32E-04
Potencial de smog	kg O ₃ equiv.	6 342	8 102	247	2 031	2 445	19 167
Consumo de combustibles fósiles	MJ	858 856	299 548	31 620	1 570 000	90 500	2 850 524

El primer indicador ambiental analizado es el de consumo de energía primaria. Se evaluaron las tres etapas de ciclo de vida mencionadas en la metodología: pre-uso, uso y fin de vida. La energía primaria total para este proyecto es de 3 324 830 MJ. A partir de esta cantidad se obtienen los porcentajes de participación de cada una de las etapas. La etapa del uso es la más significativa, se consume el 56,21% del total mencionado anteriormente; mientras que el segundo indicador importante es el pre-uso con 41,02%. En último lugar se encuentra la etapa de fin de vida con un porcentaje poco significativo de 2,76% (véase Figura 5.1).

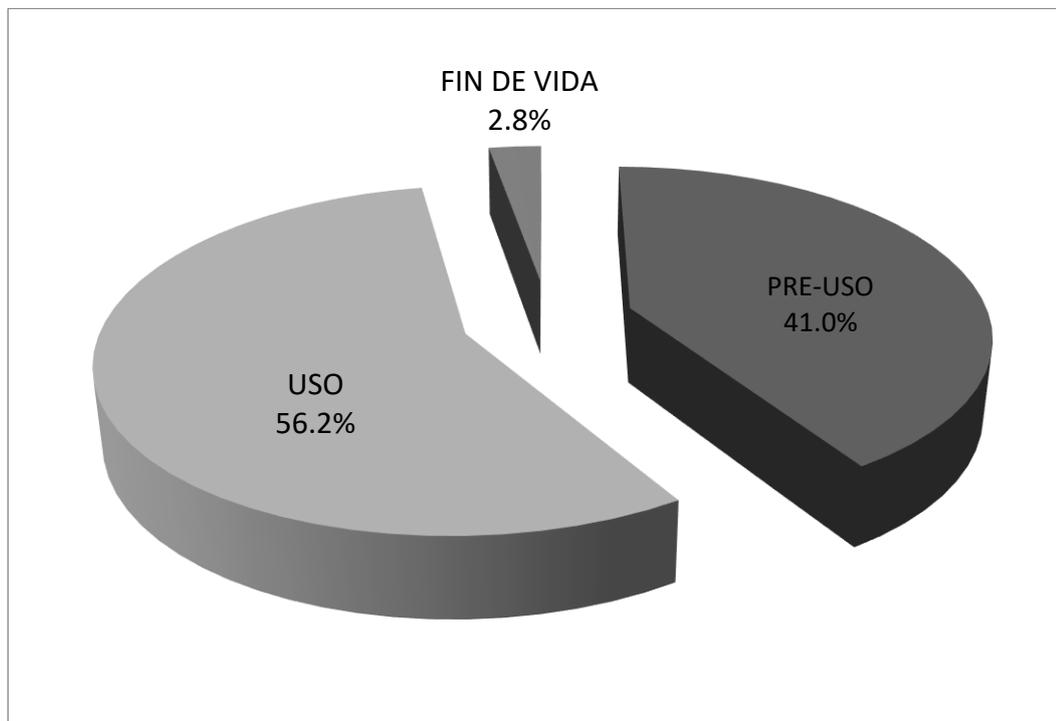


Figura 5.1 Porcentaje de utilización de energía primaria en las tres etapas del ciclo de vida

Fuente: Elaboración propia

La diferencia con la etapa de pre-uso es de casi 15%; sin embargo, el predominio de la etapa del uso es notorio. Esto se debe a que el gasto de energía por los procedimientos de mantenimiento y remodelaciones posteriores al diseño original es muy significativo. También se debe a la importancia del uso directo de energía eléctrica por los diferentes artefactos electrónicos en el tiempo de vida. Por ello, esta es la sub-etapa del ciclo de vida más significativa en empleo de energía primaria, con energía operativa de 1 830 000 MJ, la cual representa el 97,91% de la etapa de uso y el 55,04% del total (véase Figura 5.2).

En la etapa de pre-uso, se consideraron dos fases: manufactura de materiales y la construcción de la vivienda. El mayor consumo de energía se da en la etapa de manufactura con 1 060 000 MJ, que representa el 77,71% de la etapa de pre-uso y 31.88 % del total (véase Figura 5.2).

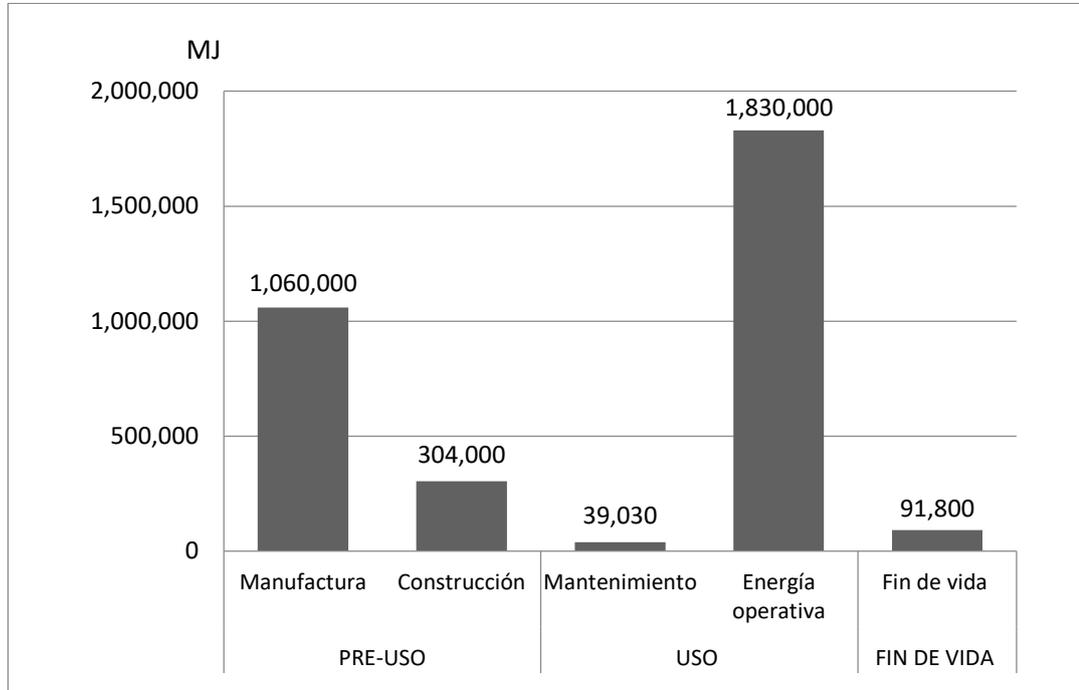


Figura 5.2 Utilización de energía primaria por etapas y sub-etapas del ciclo de vida

Fuente: Elaboración propia

Uno de los materiales que consume más energía en el proceso de manufactura es el cemento, debido a la alta temperatura necesaria para el calentamiento de la caliza en horno a 1500°C para la formación del Clinker (MIT, 2012). Además, para producir otros materiales como el acero, cal, tabiques, vidrio, aluminio, entre otros, se alcanzan temperaturas de hasta 1700°C, que requieren de energía primaria para alcanzar estas altas temperaturas (VV.AA., 2009).

Pese a que la etapa de fin de vida no implica grandes gastos de energía primaria como en las otras dos etapas, debe prestarse atención a la energía empleada para la demolición de la vivienda, el transporte de los desechos generados y su disposición final.

El segundo indicador ambiental es el potencial de calentamiento global, que genera un total de 234 792 kgCO₂-eq. A partir de los resultados mostrados, se puede discernir que la etapa que genera más cargas ambientales, potencialmente contaminantes del medio ambiente, es la etapa del pre-uso con 126 624 kgCO₂-eq,

que representa el 53,93% del total. Asimismo, la etapa del uso genera 101 623 kgCO₂-eq, que representa el 43,28% y se ubica en segundo lugar, relegando a la etapa del fin de vida con un porcentaje inferior de 2,79% (véase Figura 5.3).

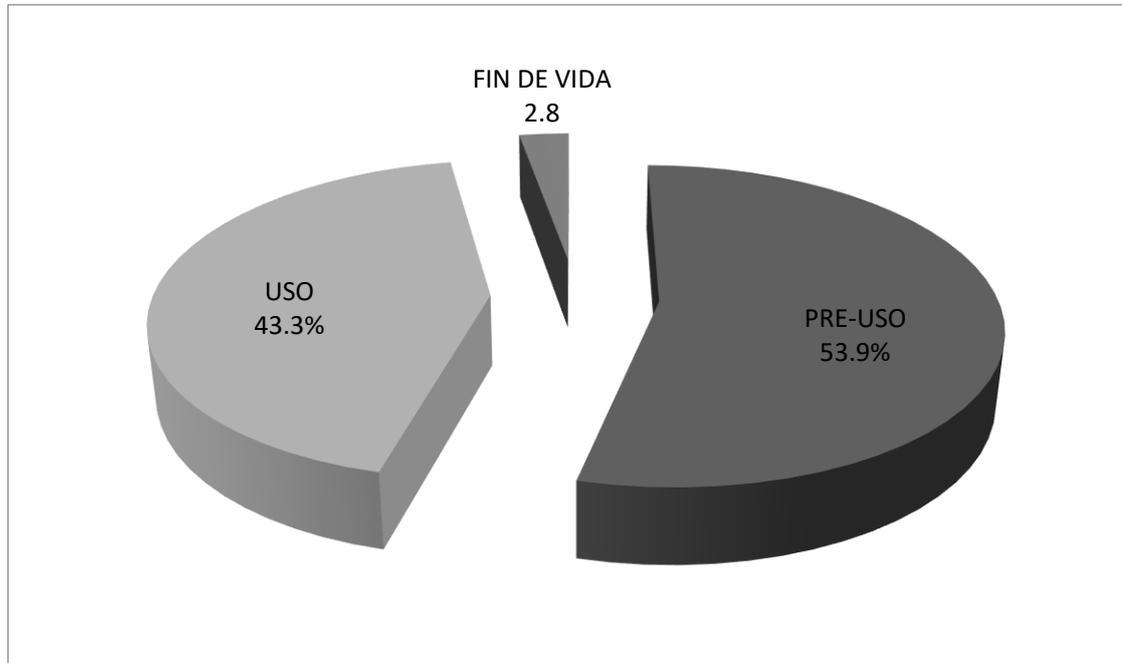


Figura 5.3 Porcentaje de potencial de calentamiento global en las tres etapas del ciclo de vida

Respecto al anterior indicador presentado en este proyecto, la etapa de pre-uso y uso cambian de posición; sin embargo, la diferencia entre ambas sigue siendo poca (10%).

Las sub-etapas del ciclo de vida que más potencial de calentamiento global tienen son la manufactura 101 702 kgCO₂-equiv., que representa cerca del 43% del total; y la energía operativa 99 500 kgCO₂-equiv., que representa el 42,38% del total. De esta manera, ambas sub-etapas se consolidan como las más importantes dentro del ciclo de vida de una vivienda unifamiliar (véase Figura 5.4).

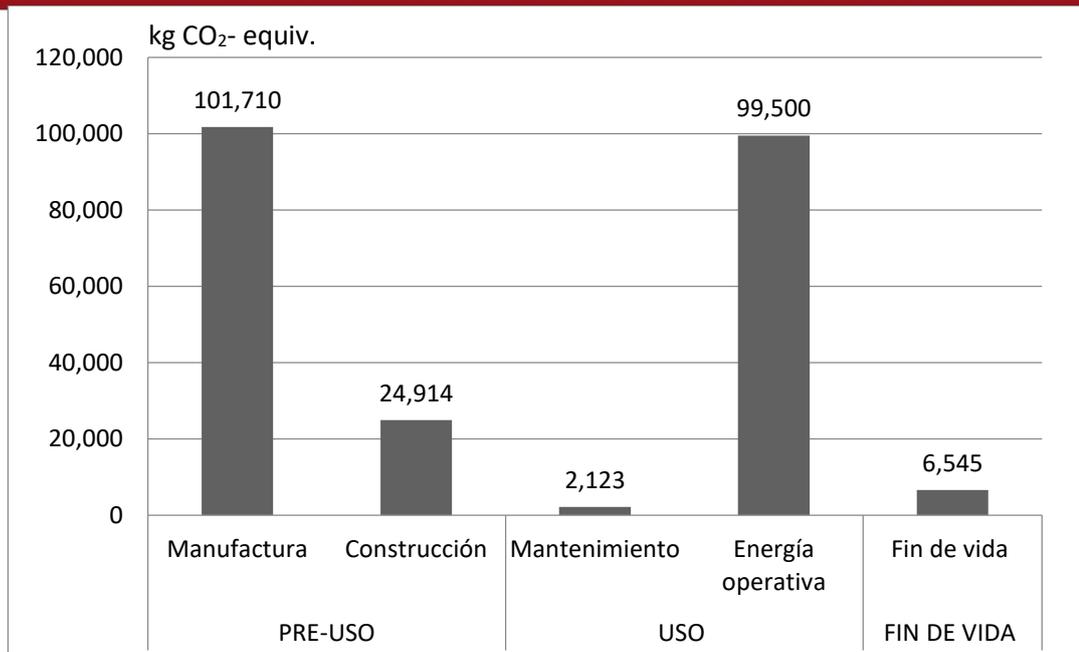


Figura 5.4 Potencial de calentamiento global por etapa y sub-etapas del ciclo de vida

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados son producto del gran desprendimiento de gases contaminantes que hay durante el proceso inicial para la manufactura de materiales de construcción. Por ejemplo, para producir cemento, se extrae la calestra en calcinador instantáneo y en solo cinco segundos libera el 95% de CO₂ presente en el polvo mediante una reacción química para separar la cal, que es el elemento más importante del cemento.

Además, el proceso de producción de materiales como el acero también genera la emisión gases contaminantes que son causantes del fenómeno de calentamiento global. Por ejemplo, la producción del acero, al calcinarse a casi 1600°C, genera el desprendimiento de polvo seco y de gases de efecto invernadero (Hidalgo, 2005).

El alto porcentaje de importancia de la energía operativa respecto a este indicador ambiental se debe a la combustión de combustibles fósiles y la producción de electricidad durante la etapa del uso.

Finalmente, pese a no tener importancia numérica considerable en el potencial de calentamiento global, la fase de fin de vida abre una ventana de posibilidades para la disminución de emisión de gases de efecto invernadero. Así, el reciclaje surge como alternativa para reutilizar productos de segunda mano, evitar que se desechen y desaprovechen sus características. De esta forma, se evitará mayor empleo de

materias primas para manufacturar productos nuevos, cuya función puede ser realizada por un producto reutilizado.

El tercer indicador ambiental es el potencial de acidificación marina, donde se produce un total de 1 567 kgSO₂-equiv. Nuevamente, se aprecia el predominio de las etapas de uso y pre-uso, relegando a la etapa de fin de vida con un porcentaje de participación menor. La etapa de uso es ligeramente mayor, con 774.88 kg SO₂, que representan el 49,45% del total, frente a la etapa de pre-uso, con 720 kgSO₂ que representan el 45,96% del total (véase Figura 5.5).

Es importante remarcar que para este indicador la diferencia entre las etapas predominantes se reduce considerablemente a 3,5%, siendo una clara muestra de la importancia de ambas. La etapa de fin de vida figura con casi el doble de porcentaje frente a los anteriores indicadores.

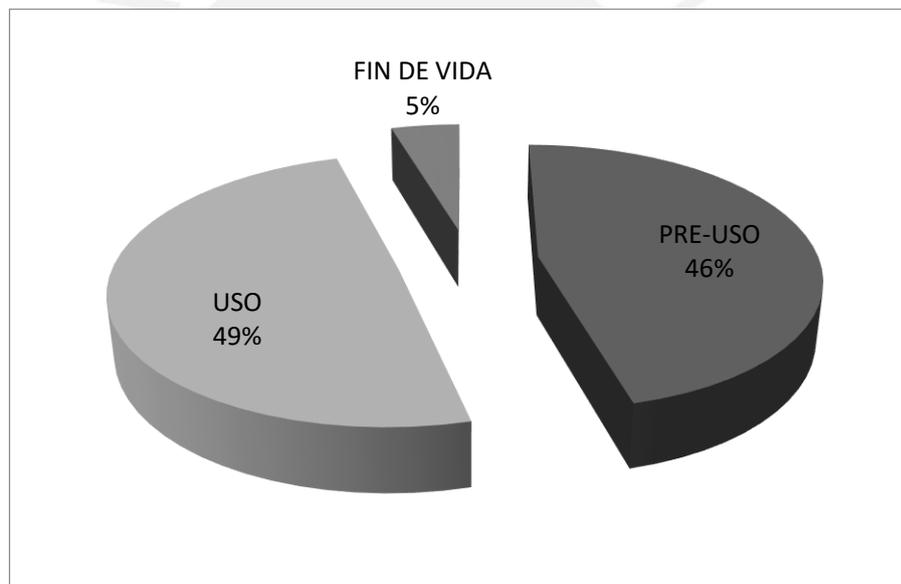


Figura 5.5 Porcentaje de potencial de acidificación marina en las tres etapas del ciclo de vida

Sin embargo, la sub-etapa que genera mayor potencial de acidificación marina es la energía operativa con 758 kg SO₂-equiv., que representa el 48,37% del total. Por ello, deben de tomarse medidas de mitigación de impacto más eficientes en esta fase del ciclo de vida de una vivienda unifamiliar. Asimismo, la fase de manufactura continúa siendo importante también en este indicador, ya que alcanza un porcentaje de 30,24% del total.

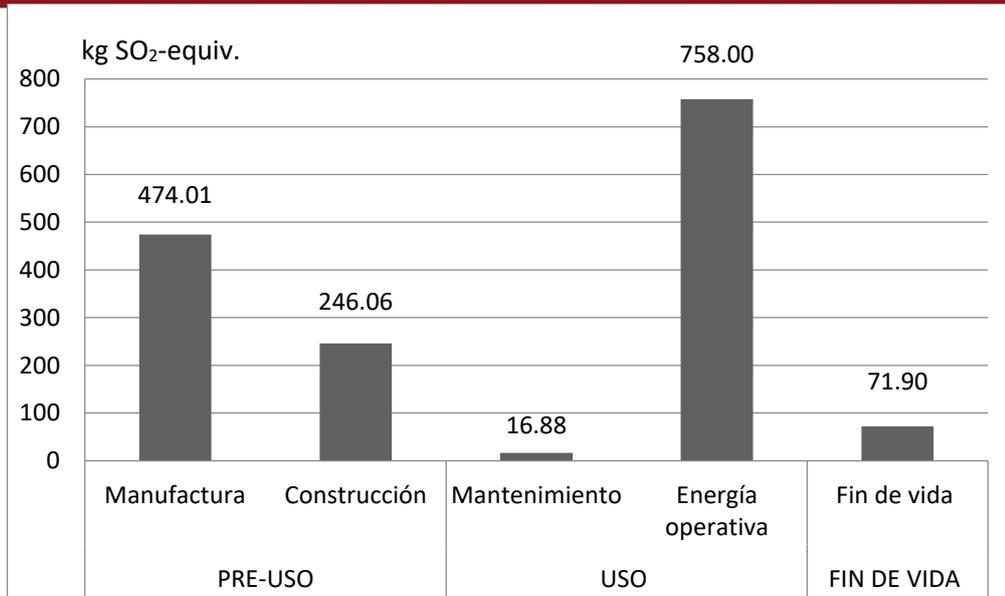


Figura 5.6 Potencial de acidificación marina por etapa y sub-etapas del ciclo de vida

Fuente: Elaboración propia

El cuarto indicador ambiental es el potencial de efecto sobre la salud, que llega a un total de 355 PM_{2,5}-eq. En este caso particular, la etapa de pre-uso se presenta como la de mayor relevancia con un valor de 287 PM_{2,5}-equiv., que representa un 80,85% determinante. En segundo lugar, se encuentra la etapa del uso con un valor menos importante de 58 PM_{2,5}-equiv., que representa el 17,89%. Nuevamente, el tercer lugar es para la etapa de fin de vida con una cifra poco significativa de 1,26% (véase Figura 5.7). Sin embargo, pese a tener poco potencial de efecto sobre la salud en la etapa de fin de vida, se pueden realizar varios procedimientos de optimización y mitigar esos impactos.

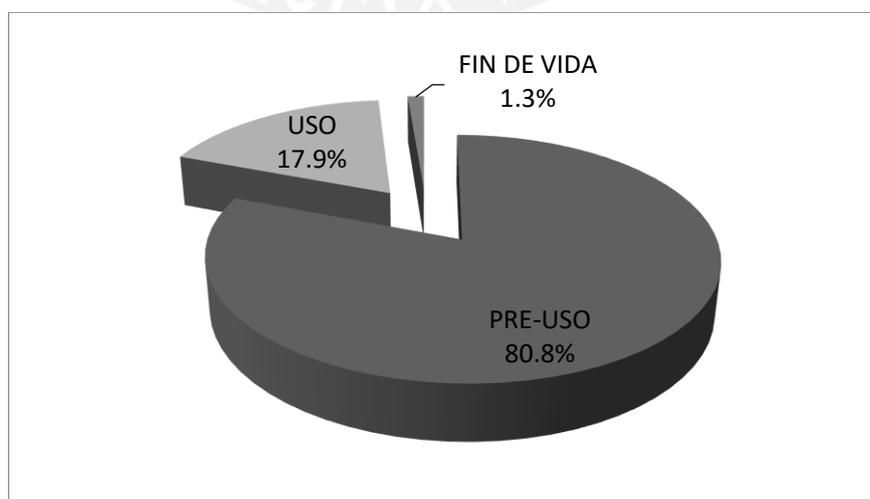


Figura 5.7 Porcentaje de potencial de efecto sobre la salud en las tres etapas del ciclo de vida

El predominio de la etapa de pre-uso se debe principalmente a las actividades realizadas en la manufactura, ya que alcanzan un valor de 263 kgPM_{2,5}-equiv, que representa el 74% de un total de 355 kgPM_{2,5}-equiv. La razón es la emisión de partículas emitidas al aire por los procesos industriales que se realizan para la obtención de los materiales de construcción (Aracelly S. Gallegos, 2006).

En menor medida, la energía operativa es la segunda fase importante para este indicador con 54 kgPM_{2,5}-equiv, que representa el 15,21%. Se debe principalmente a la combustión de combustibles fósiles y por las centrales eléctricas, para la obtención de energía en el tiempo de vida de la vivienda. Además, se genera PM_{2,5}, producto del empleo de gas natural en la etapa del uso (véase Figura 5.8).

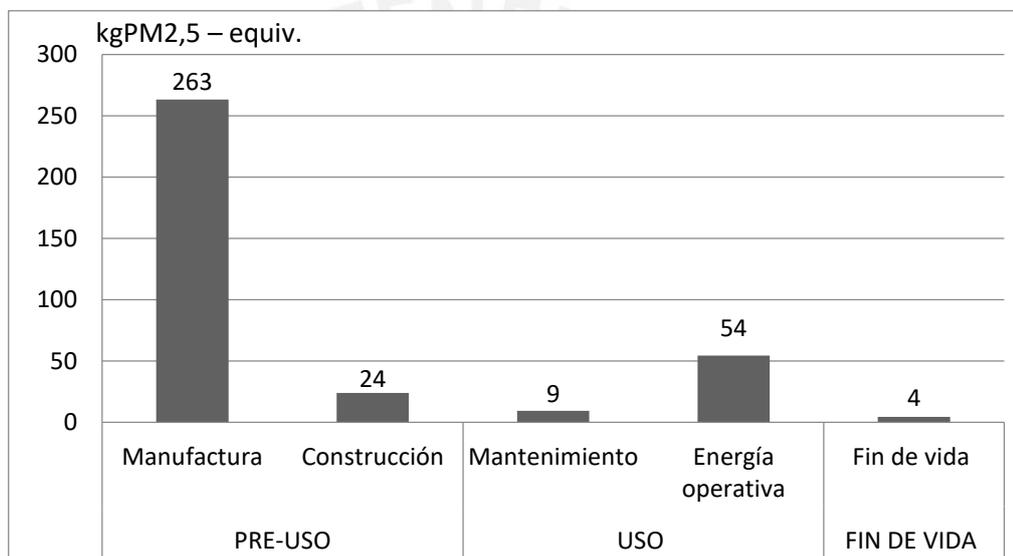


Figura 5.8 Potencial de efecto sobre la salud por etapas y sub-etapas del ciclo de vida

Finalmente, el potencial de efecto sobre la salud en la etapa de fin de vida es significativamente menor al de las otras etapas. Con 4 kgPM_{2,5}-equiv. representa el 1,13%. Sin embargo, no debe pasar desapercibido, ya que puede ser perjudicial para la salud humana.

El quinto indicador es el potencial de eutrofización con un total de 50 kg N-equiv. Para este indicador, el análisis muestra una predominancia de la etapa de pre-uso, con 29,83 kg N-equiv., que representa el 58,92% del total. Sin embargo, la etapa del uso alcanza los 15 kg N-equiv., que representa el 31,67%. Si bien este porcentaje representa la mitad de la etapa de pre-uso, su aporte también es significativo (véase Figura 5.9).

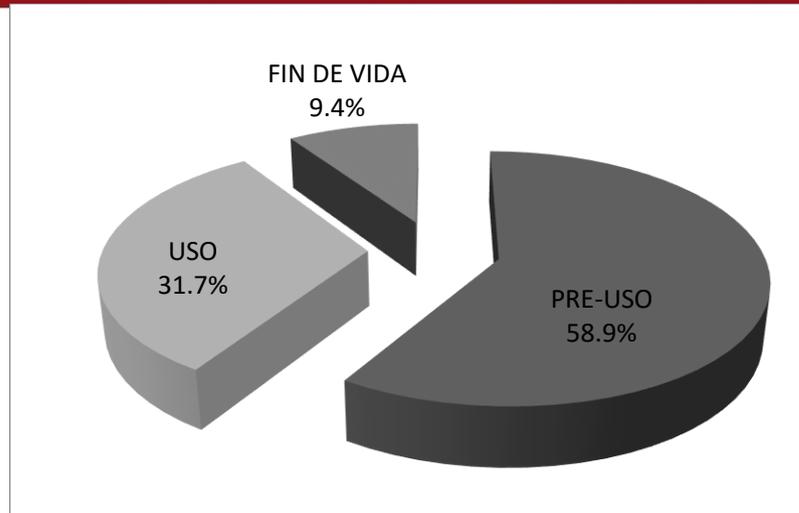


Figura 5.9 Porcentaje de potencial de eutrofización en las tres etapas del ciclo de vida

Fuente: Elaboración propia

Además, es necesario resaltar que en este indicador ambiental las dos sub-etapas del pre-uso son las predominantes. La manufactura alcanza un valor de 13.83 kg N-equiv., que representa el 27,1% del total; y la construcción, un valor de 16 kg N-equiv., que representa el 32% del total del potencial de eutrofización.

La etapa de construcción es la más importante, ya que en esta se originan los mayores vertidos ricos en fosfatos y nitratos. Además, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y fósforo (P) en los procesos industriales son los causantes del alto índice de eutrofización en la fase de manufactura de los productos (véase Figura 5.10).

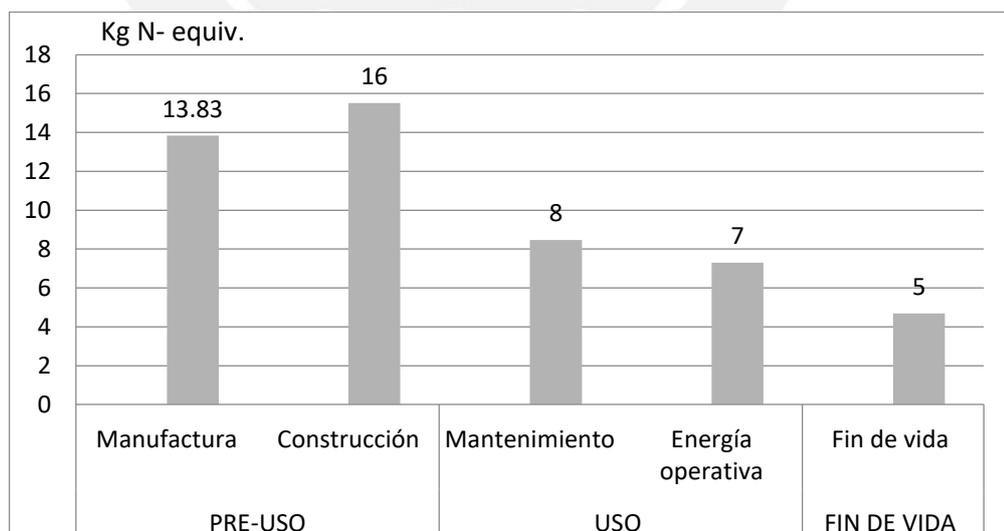


Figura 5.10 Potencial de eutrofización por etapas y sub-etapas del ciclo de vida

Fuente: Elaboración propia

El sexto indicador ambiental es el potencial de agotamiento de ozono, con un total de $7.32 \text{ E-04 kgCFC-11 equiv.}$. Para este indicador, el análisis muestra una predominancia de la etapa de pre-uso, con $7.10 \text{ E-04 kgCFC-11 equiv.}$, que representa el 96,98% del total. Además, la etapa del uso alcanza los $2.18 \text{ E-05 kgCFC-11 equiv.}$, que representa el 2,99% del total. Finalmente, la etapa de fin de vida representa solo el 0,03% (véase Figura 5.9).

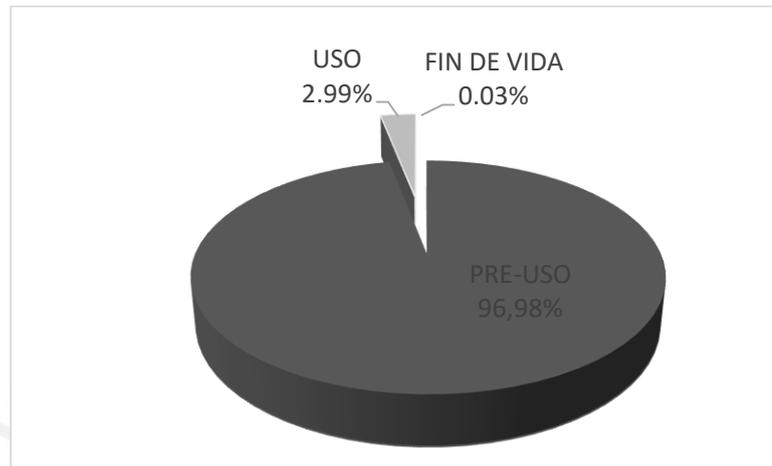


Figura 5.11 Porcentaje de potencial de agotamiento de ozono en las tres etapas del ciclo de vida

Las sub-etapa de manufactura es la predominante para el potencial de agotamiento de ozono, alcanzando los $6.62 \text{ E-04 kgCFC-11-equiv.}$, que representan el 90,48% del total. Esto se debe principalmente a que en esta sub-etapa se generan las mayores emisiones de contaminantes que están compuestos de CFC (véase Figura 5.12).

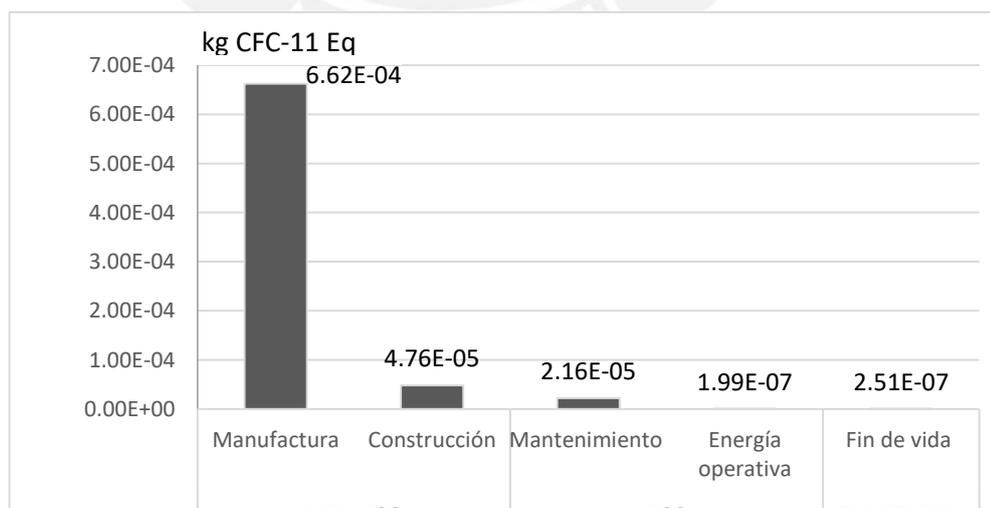


Figura 5.12 Potencial de agotamiento de ozono por etapas y sub-etapas del ciclo de vida

Fuente: Elaboración propia

El séptimo indicador ambiental definido para este proyecto es el potencial de *smog*, con un total de 19 167 kgO₃-equiv. Para este indicador ambiental, el pre-uso es la etapa predominante con 14 444 kgO₃-equiv., que representa cerca del 75% de participación. Además, una particularidad para este indicador ambiental es que la etapa de fin de vida es ligeramente mayor a la de uso (véase Figura 5.13).

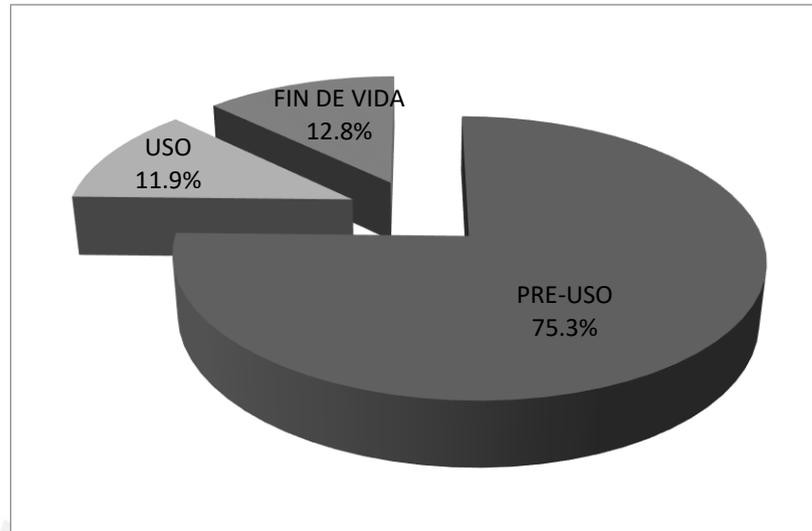


Figura 5.13 Porcentaje de potencial de formación de *smog* en las tres etapas del ciclo de vida

Las sub-etapas del pre-uso son las predominantes para el potencial de *smog*: la manufactura alcanza 6 342 kgO₃-equiv., que representa el 33,09%; y la construcción alcanza 8 102 kgO₃-equiv., que representa el 42,27% del total (véase Figura 5.12).

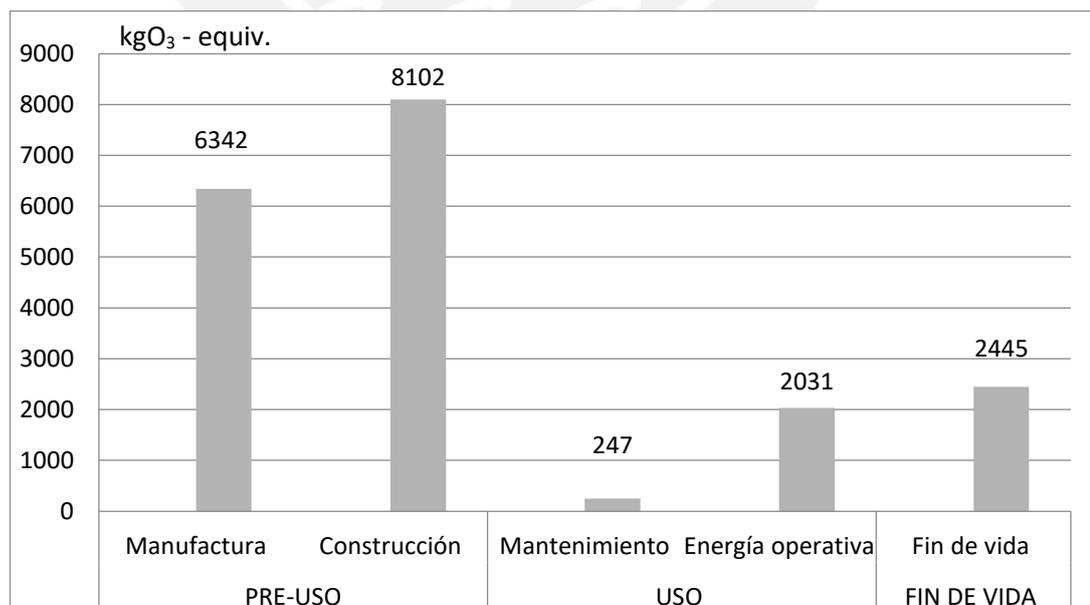


Figura 5.14 Potencial de *smog* por etapas y sub-etapas del ciclo de vida

Fuente: Elaboración propia

Pese al predominio de la etapa del pre-uso, deben de considerarse las tres etapas y buscar alternativas de solución y/o mitigación de impactos para este indicador. Debido a la peligrosidad de los contaminantes que se pueden generar, alrededor del mundo se están realizando numerosas investigaciones para encontrar alternativas que permitan la reducción de emisión de agentes contaminantes a la atmósfera. La cantidad de óxidos de nitrógeno involucrados en la producción de cemento, además de otros componentes que generan emisiones de *smog*, certifican la importancia de las fases de manufactura y construcción.

El octavo indicador es el consumo de combustibles fósiles, con un total de 2 850 524 MJ. Para este indicador, la etapa del ciclo de vida que genera mayor consumo de combustibles fósiles es la de uso, con 1 660 500 MJ, que representa el 56,19%. En segundo lugar, se encuentra la etapa de pre-uso, con un valor de 1 158 404, que representa el 40,64% (véase Figura 5.13).

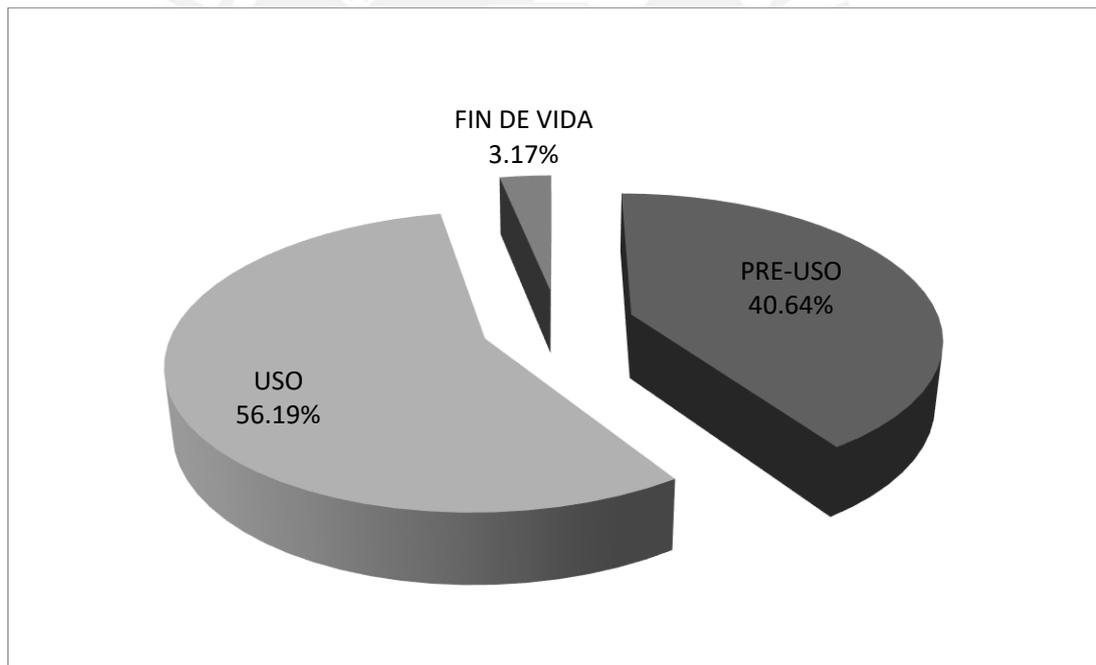


Figura 5.15 Porcentaje de consumo de combustibles fósiles en las tres etapas del ciclo de vida

La etapa de uso, fase que es la que consume más combustibles fósiles, abarca la energía operativa de la vivienda. De igual manera, el pre-uso también representa una cantidad importante de uso de combustibles fósiles, debido a que son bastante utilizados para la manufactura de los materiales.

Finalmente, la etapa de fin de vida es donde menos combustibles fósiles son empleados: 3,17%. En todos los indicadores, esta etapa ha tenido poca relevancia, sin llegar siquiera al 15% de aporte.

El consumo de combustibles fósiles, predominantemente de gas natural, es significativamente mayor para la energía operativa, seguido de la manufactura: ambos con 1 570 000 MJ (55,08%) y 858 856 MJ (30,13%), respectivamente (véase Figura 5.14).

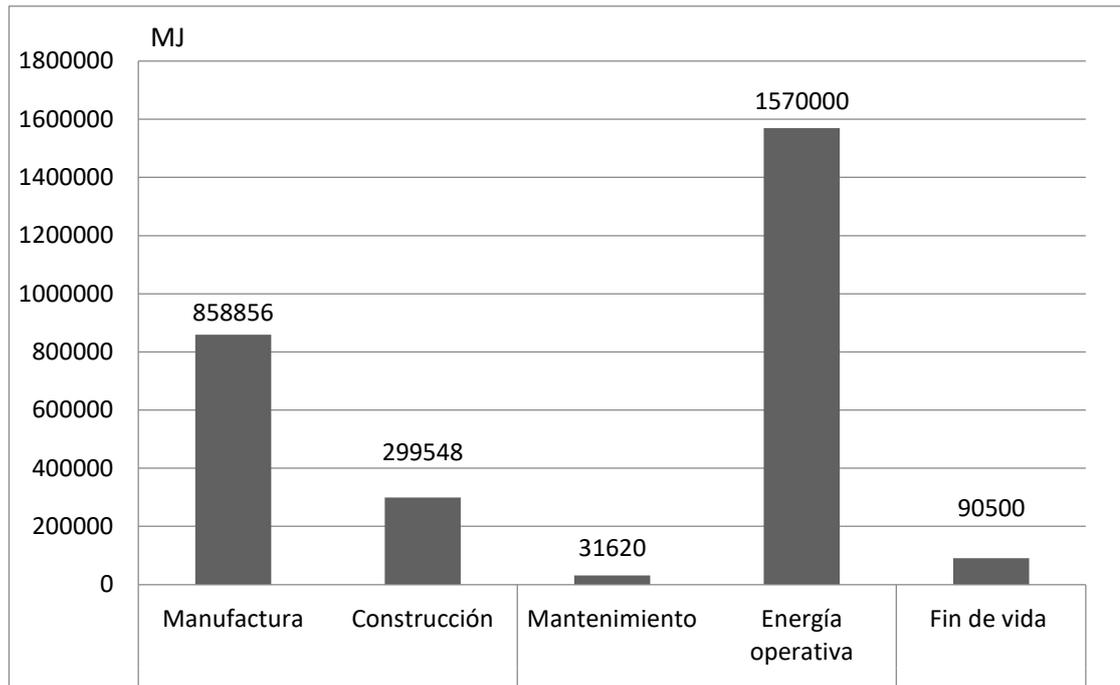


Figura 5.16 Consumo de combustibles fósiles por etapas y sub-etapas del ciclo de vida

Fuente: Elaboración propia

Además, se adjunta la lista de materiales utilizados para el diseño de esta vivienda en el *software Athena Impact Estimator*. Cada uno de los materiales está en su unidad de medida correspondiente. En la Tabla 5.3, se presenta la cantidad de material que es utilizado en cada fase del ciclo de vida de la vivienda unifamiliar tipo B en la ciudad de Huancayo. Por ejemplo, se muestra la cantidad de gas natural que es requerido por este proyecto. De esta manera se puede apreciar que la mayor cantidad de gas natural se utiliza en la fase de energía operativa, coincidiendo con lo mencionado líneas arriba para el indicador de gasto de energía primaria. Asimismo, se muestra que la manufactura es la segunda fase donde se consume la mayor cantidad de este recurso, coincidiendo también con lo mostrado en el indicador de gasto de energía primaria (véase Tabla 5.3).

Tabla 5.3 Materiales asumidos por el software para el diseño de la vivienda

Material	Unit	PRE-USO		USO		FIN DE VIDA	TOTAL
		Manufactura	Construcción	Mantenimiento	Energía Operativa	Fin de Vida	
Agua	L	409360	8998	0	0	0	432837
Agregado Fino	kg	170757	14818	0	0	0	185575
Agregado grueso	kg	124335	6207	0	0	0	130675
Arcilla y esquistos	kg	18384	1669	0	0	0	20058
Arena	kg	1455	85	0	0	0	1588
Caliza	kg	73583	6038	0	0	0	79706
Carbón	kg	15694	974	0	6417	58	23326
Ceniza	kg	473	38	0	0	0	511
Chatarra de acero	kg	23725	243	0	0	0	24040
Dióxido de carbono en el aire	kg	1573	102	884	0	0	2559
Dolomita	kg	1304	13	0	0	0	1328
Fibra de madera	kg	2152	86	0	0	0	3729
Gas natural	m3	8582	652	0	36258	214	46155
Gas natural como materia prima	m3	15	0	0	0	0	107
Lignita	kg	367	4	0	0	0	375
Material semi-cemento	kg	4092	205	0	0	0	4296
Mineral de hierro	kg	741	42	0	0	0	877
Petróleo Crudo	L	5220	3213	119	1839	2111	12502
Petróleo Crudo como materia prima	L	82	0	70	0	0	152
Yeso natural	kg	3235	268	0	0	0	3503
Otros materiales	kg	287	0	312	0	0	599

Fuente: Adaptado de Resultados *Athena Impact Estimator* – Proyecto vivienda unifamiliar

En las Figuras 5.1- 5.15, se muestra la incidencia de las etapas del ciclo de vida en cada uno de los indicadores ambientales analizados en este proyecto. Si bien es cierto que la etapa del uso es importante por la cantidad de energía primaria que se utiliza, también se debe tener en cuenta a la etapa de pre-uso, debe ser considerada de suma importancia ya que es la que predomina porcentualmente en la mayor cantidad de indicadores ambientales.

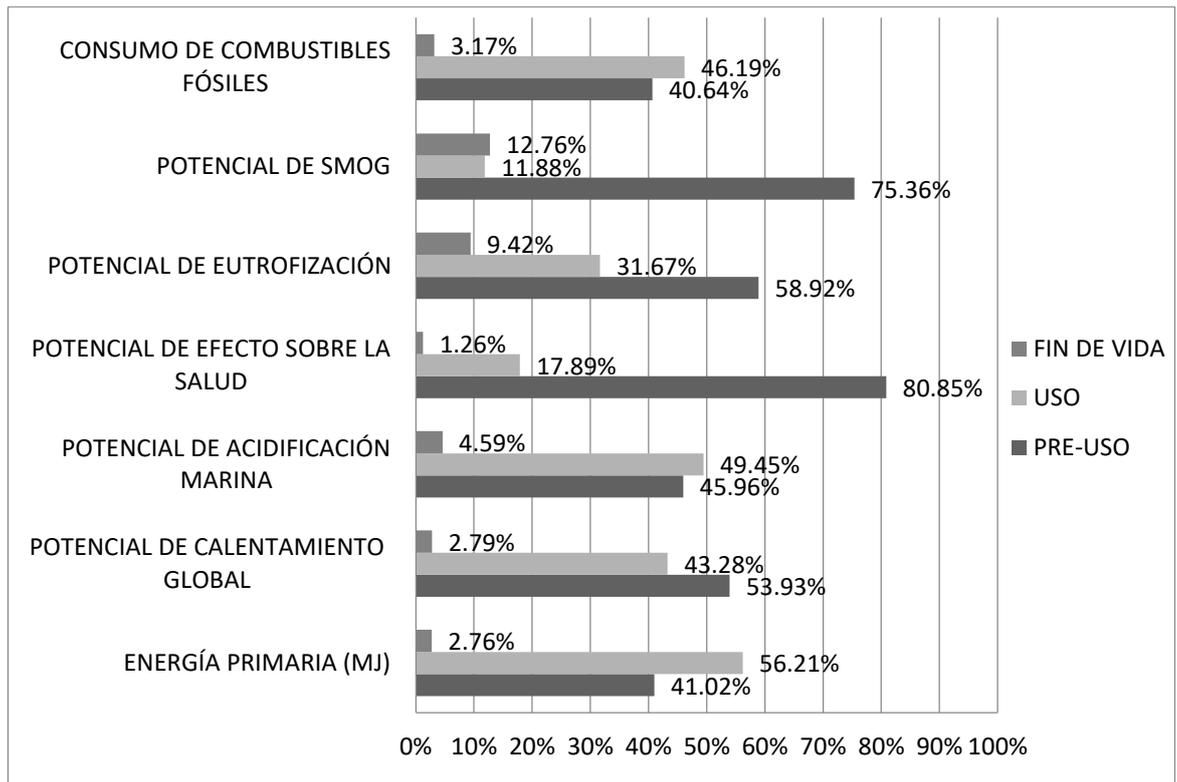


Figura 5.17 Porcentaje de participación de cada etapa de ciclo de vida en cada uno de los indicadores ambientales

Finalmente, como fue mencionado líneas arriba, el porcentaje de participación de la etapa de fin de vida en la generación de cargas ambientales no es significativo. Esto debido a que en esta fase, la disposición final de los materiales no genera grandes cantidades de contaminantes en comparación a las etapas de pre-uso y uso. Sin embargo, es importante trabajar en la búsqueda de alternativas para la mitigación de su impacto y reducir aún más los impactos ambientales que genera.

Los desechos que se generan en la etapa de fin de vida se conocen habitualmente como escombros. La mayor parte de estos no son contaminantes al ser desechados; sin embargo, algunos residuos con proporciones significativas de amianto, fibras

minerales o disolventes y aditivos de concreto, pueden ser perjudiciales para la salud humana. La mayor parte de estos residuos son dispuestos en vertederos, que si bien en principio no generan contaminantes importantes, sí producen un gran impacto visual y paisajístico negativo, en adición con el despilfarro de materias primas que impiden su reciclado (Cabello, 2012) .

5.2 Comparación entre tabiquería de bloques de concreto y ladrillos de arcilla

En el presente proyecto también se realizó el diseño de la vivienda con tabiquería de ladrillos de arcilla, para identificar las variaciones numéricas que se presentaban respecto al diseño con bloques de concreto en todos los indicadores ambientales definidos.

En la Tabla 5.4, se muestran las cantidades de impacto que se generan en cada indicador ambiental cuando se realiza la producción de una unidad de bloques de concreto y una unidad de ladrillo de arcilla. Estos datos pueden ser comparados para cada etapa y sub-etapa del ciclo de vida.

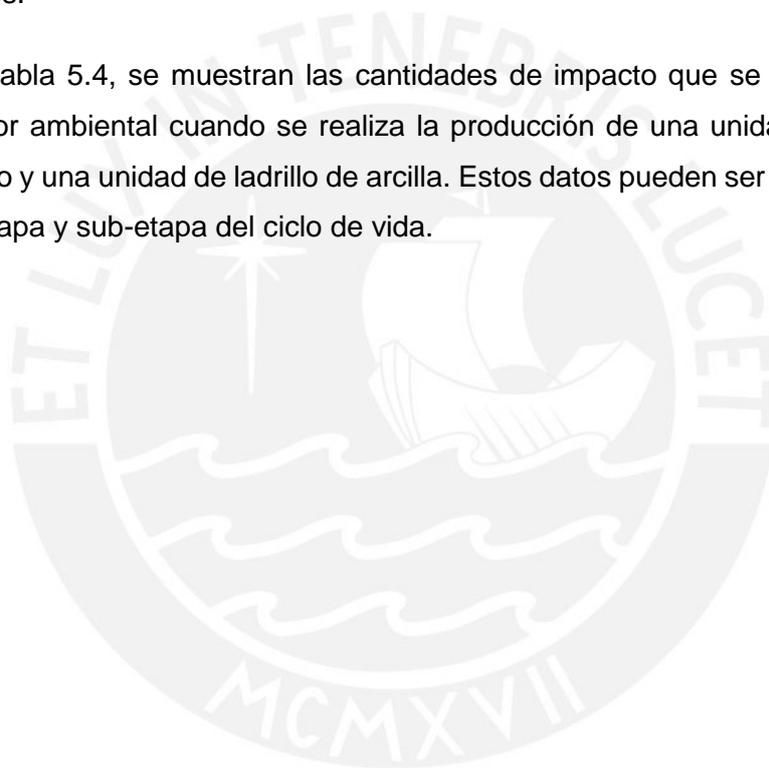


Tabla 5.4 Impactos ambientales generados en cada indicador ambiental para dos tipos de tabiquería

Indicador Ambiental	Tipo de tabiquería	Unidad	PRE-USO		USO		FIN DE VIDA	Total
			MANUFACTURA	CONSTRUCCIÓN	MANTENIMIENTO	ENERGÍA OPERATIVA	FIN DE VIDA	
ENERGÍA PRIMARIA	BLOQUE DE CONCRETO	MJ	1 064 358	303 790	39 058	1 830 645	91 831	3 329 682
	LADRILLO DE ARCILLA	MJ	814 906	250 527	35 273	1 830 645	69 343	3 000 694
POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL	BLOQUE DE CONCRETO	Kg CO2 equiv.	101 710	24 914	2 122	99 515	6 545	234 807
	LADRILLO DE ARCILLA	Kg CO2 equiv.	80 248	20 034	2 039	99 515	4 985	206 822
POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN MARINA	BLOQUE DE CONCRETO	Kg SO2 equiv.	474	246	17	758	72	1 567
	LADRILLO DE ARCILLA	Kg SO2 equiv.	439	209	17	758	56	1 479
POTENCIAL DE EFECTO SOBRE LA SALUD	BLOQUE DE CONCRETO	Kg PM2.5 equiv.	263	24	9	54	4	354
	LADRILLO DE ARCILLA	Kg PM2.5 equiv.	178	20	8	54	3	263
POTENCIAL DE EUTROFIZACIÓN	BLOQUE DE CONCRETO	Kg N equiv.	14	16	8	7	5	50
	LADRILLO DE ARCILLA	Kg N equiv.	12	13	7	7	4	43
POTENCIAL DE SMOG	BLOQUE DE CONCRETO	Kgo O3 equiv.	6 342	8 102	247	2 031	2 445	19 167
	LADRILLO DE ARCILLA	Kg O3 equiv.	5 466	6 775	187	2 031	1 940	16 399
CONSUMO DE COMBUSTIBLES FÓSILES	BLOQUE DE CONCRETO	MJ	858 856	299 548	31 628	1 571 305	90 451	2 851 788
	LADRILLO DE ARCILLA	MJ	706 895	247 260	30 305	1 571 305	68 698	2 624 463

Fuente: Elaboración propia

El primer indicador para verificar las diferencias entre ambos tipos de tabiquería es la energía primaria. Las diferencias entre ambos en cada fase del ciclo de vida no son considerables, teniendo en cuenta que el total de utilización de energía primaria es de aproximadamente el 10%. En ambos sistemas de tabiquería, la fase predominante es la energía operativa, mientras que el fin de vida es la fase que registra menor valor.

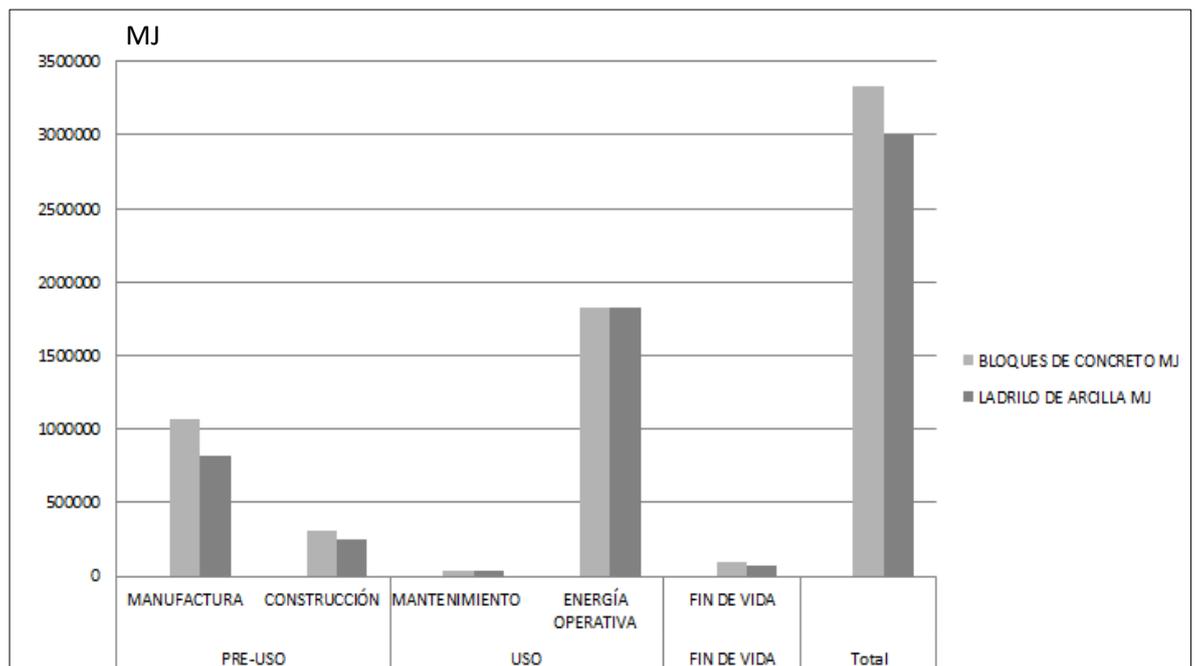


Figura 5.18 Energía primaria en las etapas y sub-etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería

De la Figura 5.18 se puede inferir que no existe diferencia considerable en utilizar ladrillos de arcilla o bloques de concreto, ya que la energía primaria que consumen es numéricamente próxima. Sin embargo, en la fase donde se denota mayor diferencia es en la manufactura, ya que para la elaboración de bloques de concreto, se utiliza más energía primaria que para la elaboración de bloques de arcilla. Esto se da debido a la temperatura alcanzada y la extracción de minerales necesarias para la manufactura del cemento, que es el componente principal de estos bloques.

El segundo indicador para la diferenciación entre los bloques de concreto y ladrillos de arcilla es el potencial de calentamiento global. Para este caso, nuevamente los bloques de concreto marcan diferencia notoria con respecto a la otra alternativa. La cantidad total de $\text{kgCO}_2\text{-equiv.}$ que se emite utilizando ladrillos de arcilla es de 206 822 frente a los 234 807 que se emiten utilizando los bloques de concreto, que

representa el 14% más del total de ladrillos de arcilla. Para este segundo indicador, la diferencia entre ambos tipos de tabiquería es marcada en la etapa de manufactura. La cantidad de kgCO₂-equiv. que se emite en la manufactura de ladrillos de arcilla representa el 75% de lo que se emite en la producción de bloques de concreto. Esto se debe principalmente a la cantidad de gases de efecto invernadero que se emiten en la etapa de calcinación del CaCO₃ para la producción del cemento.

Al producirse la reacción CaCO₃ + calor se emiten tres gases de efecto invernadero: el azufre, los compuestos NO_x y CO₂. Sin embargo, las emisiones de los dos primeros compuestos no son significativos frente a las emisiones de CO₂, que actualmente alcanza 1.6 Bt/y y está incrementando (McCaffrey, 2002). Además de los gases de efecto invernadero que se emiten a la atmósfera en el proceso de transporte de materias primas para su manufactura (Warm Version 13, 2015).

Por otro lado, la sub-etapa de mantenimiento es la que emite menos kgCO₂ para ambos tipos de tabiquería, con menos del 1%. Por su parte, la etapa de fin de vida alcanzó, en ambos casos, menos del 3% del total de emisiones (véase Figura 5.19).

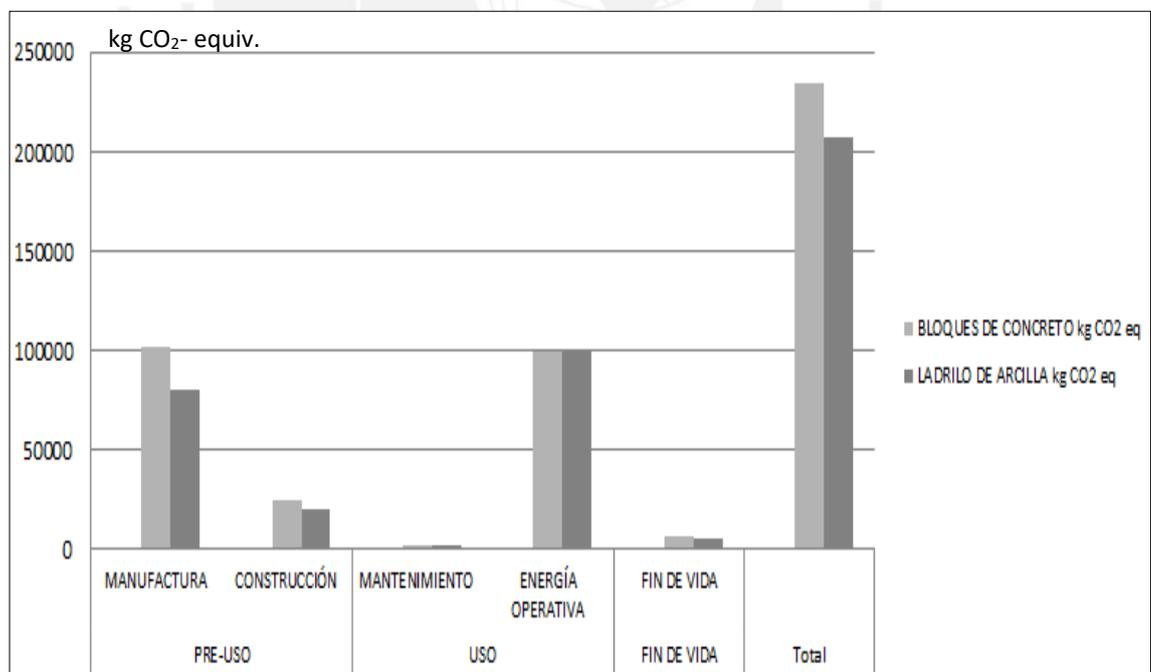


Figura 5.19 Potencial de calentamiento global en las etapas y sub-etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería

El tercer indicador en las diferencias entre ambos tipos de tabiquería es el potencial de acidificación marina. Sin embargo, como en los dos indicadores anteriores las diferencias entre ambos tipos de tabiquería es mínima (5,6%). Además, los bloques de concreto continúan como la alternativa que genera mayores impactos en el caso del potencial de acidificación marina.

Como se observa en la Figura 5.20, la cantidad de energía operativa para ambos sistemas es el mismo. Sin embargo, las sub-etapas que generan una pequeña variación entre ambos son la manufactura, construcción y fin de vida.

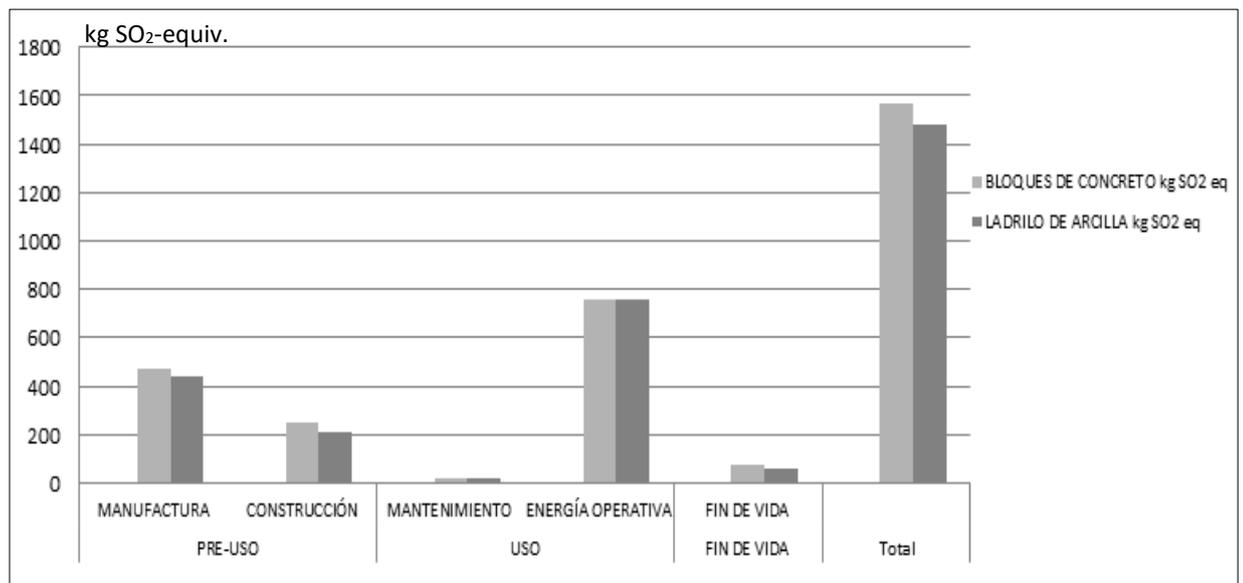


Figura 5.20 Potencial de acidificaciones marinas en las etapas y sub-etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería

El cuarto indicador de comparación es el potencial de efecto sobre la salud. En este caso, la predominancia de las emisiones por el uso de bloques de concreto es más significativa que en los anteriores indicadores. Esto se debe a que los ladrillos de arcilla emiten 263 kgPM_{2,5}-equiv., que representa solo el 74% del total de emisiones de la otra alternativa.

Como se aprecia en la Figura 5.21, la sub-etapa predominante del ciclo de vida para ambos tipos de tabiquería es la manufactura. Por ello, la producción de los materiales, extracción de materia prima y su transporte son las actividades que generan mayor cantidad de emisiones de kgPM_{2,5}-equiv. Además, la etapa de fin de vida es la segunda fase con mayores emisiones, seguida de la construcción y mantenimiento. La etapa de fin de vida es la que menos emisiones genera en este indicador de impacto ambiental, con alrededor de 1,5% en ambos sistemas de albañilería.

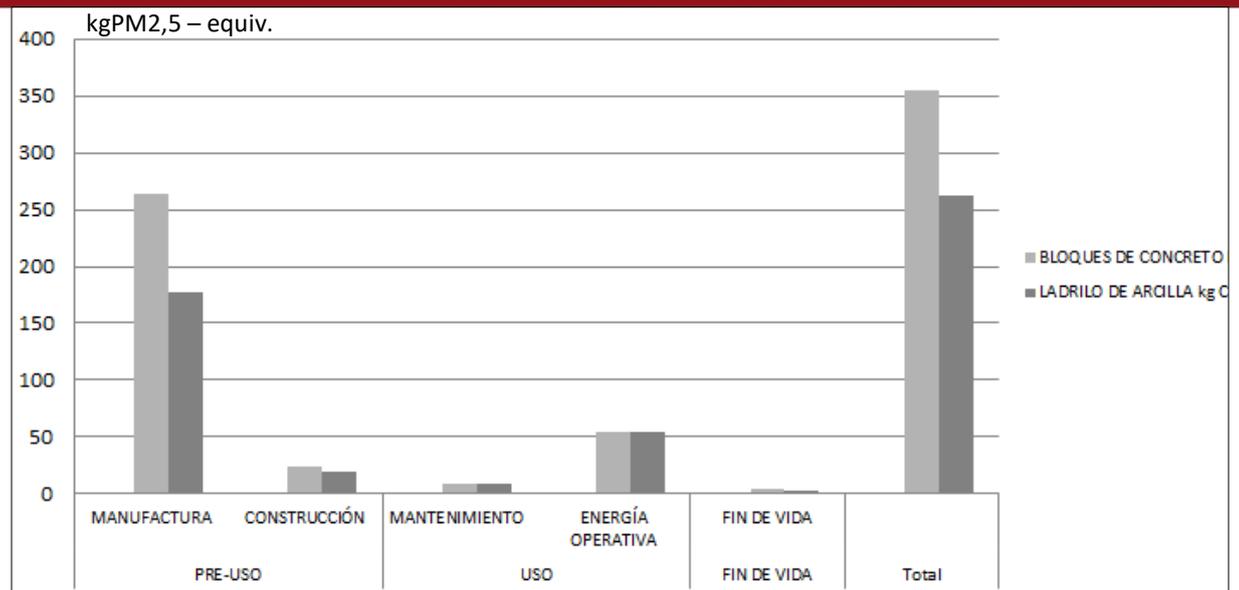


Figura 5.21 Potencial de efecto sobre la salud en las etapas y sub-etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería

El quinto indicador analizado para verificar las diferencias entre ambos tipos de tabiquería es el potencial de eutrofización. Si bien no existen grandes diferencias entre todas las sub-etapas del ciclo de vida para ambos sistemas, el pre-uso es la etapa más importante, ya que genera el 60% de las emisiones en kg N-equiv. A partir de estos datos, no se puede inferir la mejor opción en la utilización de estos materiales en sistemas de albañilería, ya que ambos tienen emisiones muy parecidas.

Sin embargo, se puede mencionar al proceso de calcinación para la obtención de cemento y arcilla, como la actividad que genera emisiones de gas nitrógeno al aire, agua y suelo. Pese a que estas emisiones no son considerablemente altas para el medio ambiente, se debe tener cuidado y buscar alternativas para mitigarlas, teniendo en cuenta que pueden entrar en el medio ambiente durante la fabricación de productos de construcción o las emisiones de combustión que se desechan. Asimismo, podría traer como consecuencia el cambio en la disponibilidad de nutrientes en el agua y luego manifestarse como un crecimiento acelerado de las algas, provocando así la muerte de peces y otras especies vivas en el agua (Life Cycle Engineering Experts GMBH, 2010).

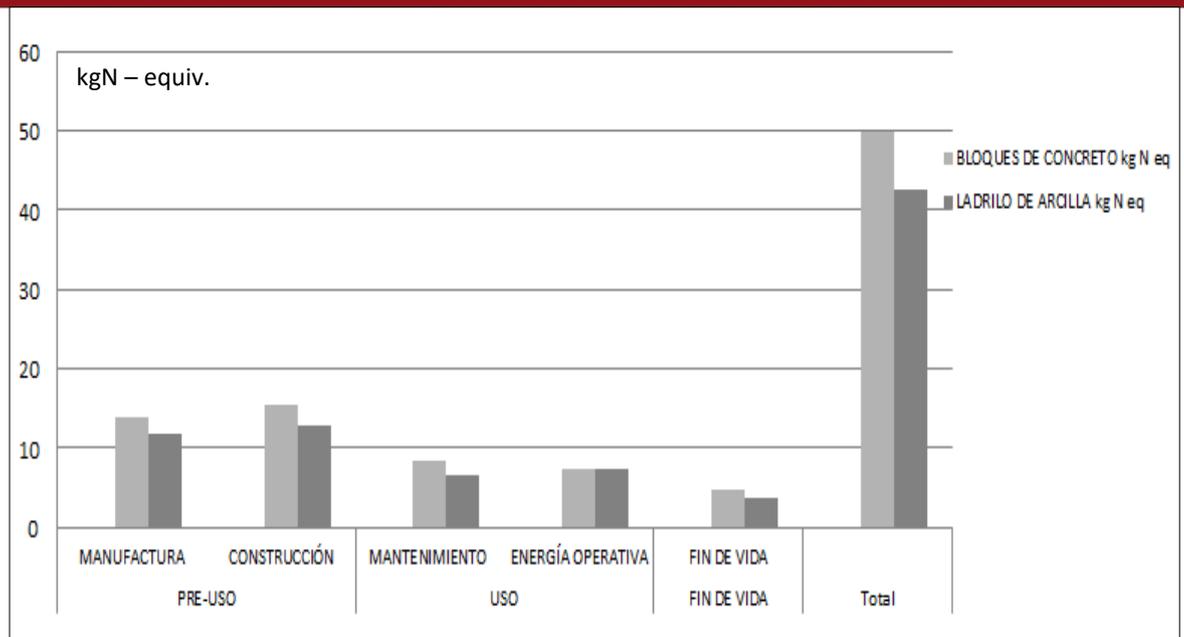


Figura 5.22 Potencial eutrofización en las etapas y sub-etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería

El sexto indicador para verificar las diferencias entre ambos tipos de tabiquería es el potencial de *smog*. Para este indicador, los bloques de concreto provocan la mayor cantidad de emisiones en $\text{kgO}_3\text{-equiv}$. La diferencia entre ambas es de 17%, que ya es un porcentaje considerable. Para ambos sistemas de albañilería, las fases de construcción y manufactura son las más importantes y donde se generan las mayores emisiones de contaminantes.

Como se aprecia en la Figura 5.23, las sub-etapas de ambos tipos de tabiquería no tienen grandes diferencias numéricas. Sin embargo, las emisiones de las etapas de construcción y manufactura para los bloques de concreto sí son considerablemente mayores a las de los ladrillos de arcilla. A partir de estos resultados, se puede inferir que los ladrillos de arcilla producen menos potencial de *smog* al ser utilizados en viviendas tipo B.

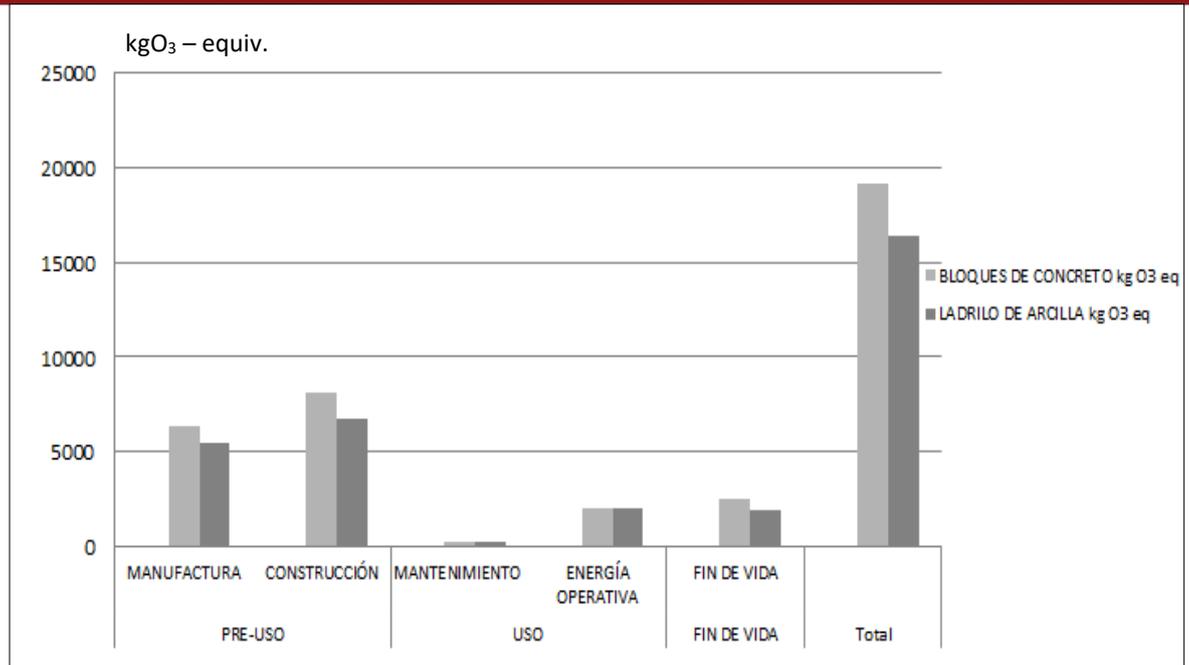


Figura 5.23 Potencial de smog en las etapas y sub-etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería

El séptimo indicador para verificar las diferencias entre ambos tipos de tabiquería es el uso de combustibles fósiles. Para este indicador tampoco se estimaron diferencias importantes entre ambos sistemas, debido a que el porcentaje de diferencia entre ambos es de 8 %. Sin embargo, cabe mencionar que el sistema que utiliza los bloques de concreto es el que mayor cantidad de combustibles fósiles emplea, con un total de 2 851 788 MJ frente a los 2 624 463 MJ que emplean los ladrillos de arcilla.

Como se aprecia en la Figura 5.24, nuevamente todas las fases del ciclo de vida tienen los mismos valores numéricos. La energía operativa, que es la sub-etapa con mayor relevancia en la emisión de combustibles fósiles, presenta igual cantidad de emisión para ambos sistemas de albañilería. Sin embargo, la diferencia se da en las sub-etapas de manufactura y construcción que pertenecen a la etapa de pre-uso. Esto se debe a que en la manufactura del concreto y el acero, así como para la construcción del sistema de bloques de concreto, se utilizan mayores cantidades de combustibles fósiles que en el caso de los ladrillos de arcilla.

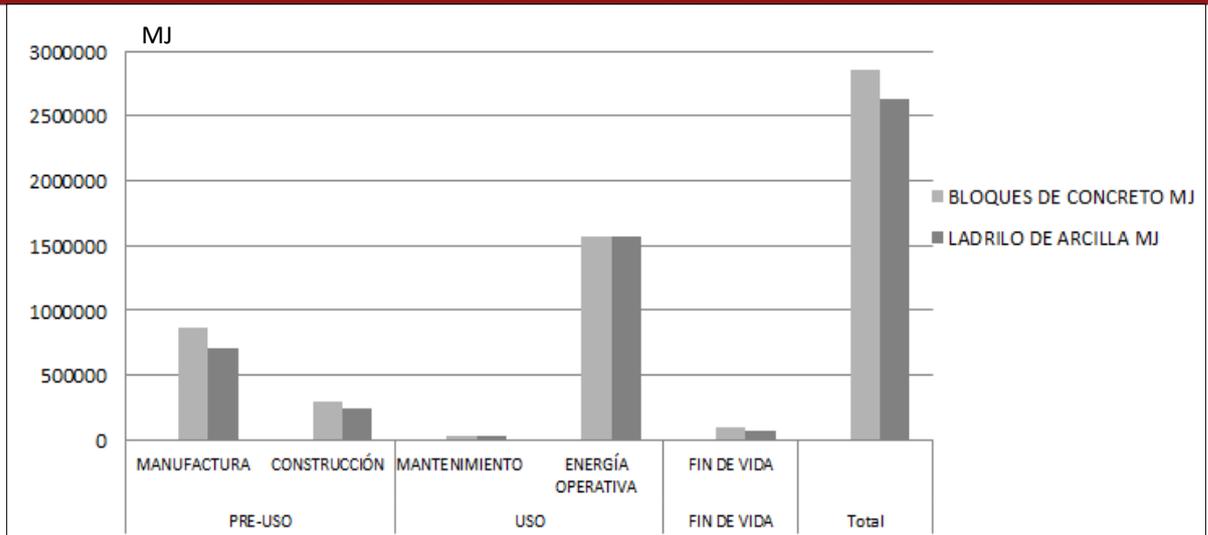


Figura 5.24 Consumo de combustibles fósiles en las etapas y sub-etapas del ciclo de vida para dos distintos materiales de tabiquería



CAPITULO 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este estudio no solo brinda información cuantitativa de los efectos que produce un proyecto constructivo, sino que también pretende informar las consecuencias ambientales que se generan en cada una de sus etapas de ciclo de vida.

En el presente capítulo, se realizará la discusión de los resultados obtenidos en el Análisis de Ciclo de Vida de la vivienda unifamiliar para cada indicador ambiental que fue definido en la metodología.

Además, en este capítulo se mostrarán resultados de otros estudios y se verificará la relación que tienen con este proyecto. Sin embargo, se debe tener claro que todos los proyectos son realizados con distintos *software* (SimaPro, Athena), pero utilizando la misma metodología de ACV. Por lo tanto, algunos resultados van a ser comparados solo porcentualmente. A pesar de ello, se busca la forma de relacionarlos y plantear comparaciones que enriquezcan la calidad de datos presentados en este proyecto.

El primer indicador evaluado en este proyecto fue el consumo de energía primaria, que se refiere al tipo de energía contenida en los combustibles crudos, como la energía solar, eólica, etc., antes de ser transformados. Para este indicador se encontró que la etapa más importante, donde se consume mayor energía primaria, es el uso. Esto se debe a que se necesita una gran cantidad de energía para que la vivienda pueda suplir los requerimientos con que fue construida a lo largo de todo su tiempo de vida. La importancia de la fase de energía operativa surge por el consumo de energía eléctrica para la iluminación, en los electrodomésticos, en los aparatos de uso personal (tecnológicos, físicos, etc.).

La etapa de pre-uso también es importante en el uso de energía primaria, ya que para la manufactura de los materiales de construcción en la ciudad de Huancayo se emplea gran cantidad de energía. Por ejemplo, para la producción de cemento, ladrillos de arcilla y ladrillos de concreto, que alcanzan altas temperaturas de cocción, se utilizan derivados de combustibles fósiles.

En los estudios presentados en la Tabla 6.1, se presentan distintos escenarios planteados en diferentes países del mundo, de donde se pueden desprender relaciones importantes con este proyecto. En estos estudios realizados por diversos autores, se aprecia que la cantidad de energía primaria es utilizada principalmente

en la etapa de uso. En segundo lugar, se encuentra la etapa del pre-uso; y finalmente, la etapa de fin de vida con poca importancia en cada una de ellas.

En el caso del estudio realizado por Kahhat y colegas (2009), se realizó el ACV de una vivienda de 200 m² en el estado de Arizona utilizando diferentes sistemas de muros exteriores. Los resultados muestran que para la etapa del uso se consume un total de 95,1% de energía primaria, porcentaje bastante mayor al encontrado en el presente proyecto. Esto se debe a que en el mencionado proyecto para la fase de energía operativa, se tomaron en consideración la utilización de agua caliente, ventilación, aire acondicionado, calefacción, diversos equipos y luminaria para todos los ambientes. Estos factores provocan que la mayor cantidad de energía primaria del total consumido por este tipo de vivienda, sea utilizada en la etapa del uso.

Tabla 6.1 Consumo de energía primaria por metro cuadrado para distintos proyectos de ACV en cada etapa del ciclo de vida

CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA PRIMARIA (GJ/m ²)				
AUTOR	PROYECTO	ETAPAS DEL CICLO DE VIDA		
		PRE - USO	USO	FIN DE VIDA
KAHHAT, CRITTENDEN, SHARIF, FONSECA, LI, SAWHNEY Y ZANG	Life Cycle of Residential Buildings Using Different Exterior Wall Systems	3.4 (5 %)	65.9 (95 %)	0 (0 %)
	Tiempo de vida: 50 años			
	Área del proyecto: 200 m ²			
	Ubicación: Phoenix - USA			
KOFOWOROLA Y GHEEWALA	Life Cycle Energy Assessment of a Typical Office Building in Thailand	6.4 (17 %)	30.1 (82 %)	0.2 (1 %)
	Tiempo de vida: 50 años			
	Área del proyecto: 60 000 m ²			
	Ubicación: Tailandia			
MOLINA PASQUEL	Análisis de Ciclo de Vida en Edificaciones	2-6 %	93 – 97 %	< 1 %
	Tiempo de vida: 50 años			
	Área del proyecto: 960 m ²			
	Ubicación: D.F. de México			
GARCÍA TORRES	Evaluación Ambiental Durante el Ciclo de Vida de una Vivienda Unifamiliar	7.2 (42 %)	9.3 (55 %)	0.43 (3 %)
	Tiempo de vida: 50 años			
	Área del proyecto: 480 m ²			
	Ubicación: Lima - Perú			
CORZO REMIGIO	Análisis de Ciclo de vida de una Vivienda Unifamiliar en Huancayo	10.5 (41 %)	14.4 (56 %)	0.7 (3 %)
	Tiempo de vida: 50 años			
	Área del proyecto: 130 m ²			
	Ubicación: Huancayo - Perú			

Fuente: Elaboración propia

Similar situación se aprecia en el estudio realizado por Kofoworola et al (2009), donde se analizó una edificación de oficinas de 60 000 m² utilizando el método de Análisis de Ciclo de Vida de Procesos Energéticos. Los resultados de este proyecto muestran que la etapa con mayor gasto de energía primaria es la del uso, con el 82% del total. La segunda etapa que genera más consumo de energía primaria es el pre-uso, con 17%; y finalmente, la etapa de fin de vida que consume el 1% de energía. La etapa del uso alcanza altos niveles de consumo, debido a que la fase de energía operativa para este proyecto también es alta, abarcando el 81% del total (véase Figura 6.1).

Estas conclusiones van en la línea del estudio realizado por Kahhat, ya que los resultados son próximos porcentual y numéricamente a los encontrados en el proyecto realizado por Kofoworola. En ambos estudios, se muestra un alto porcentaje en la fase de uso, debido a la utilización de aire acondicionado, los equipos de oficina y la carga luminaria empleada. Como se puede apreciar en la Figura 6.2, el aire acondicionado emplea el 56% de la energía operativa, seguido de equipos de oficina con 17% y la carga luminaria con 16%. Estos resultados se diferencian de los encontrados en este proyecto de vivienda unifamiliar tipo B, ya que en la ciudad donde fue desarrollada —y teniendo en cuenta el nivel socioeconómico al que va dirigida— no se utiliza aire acondicionado, la carga luminaria es poca y la utilización de artefactos y equipos es mucho menor.

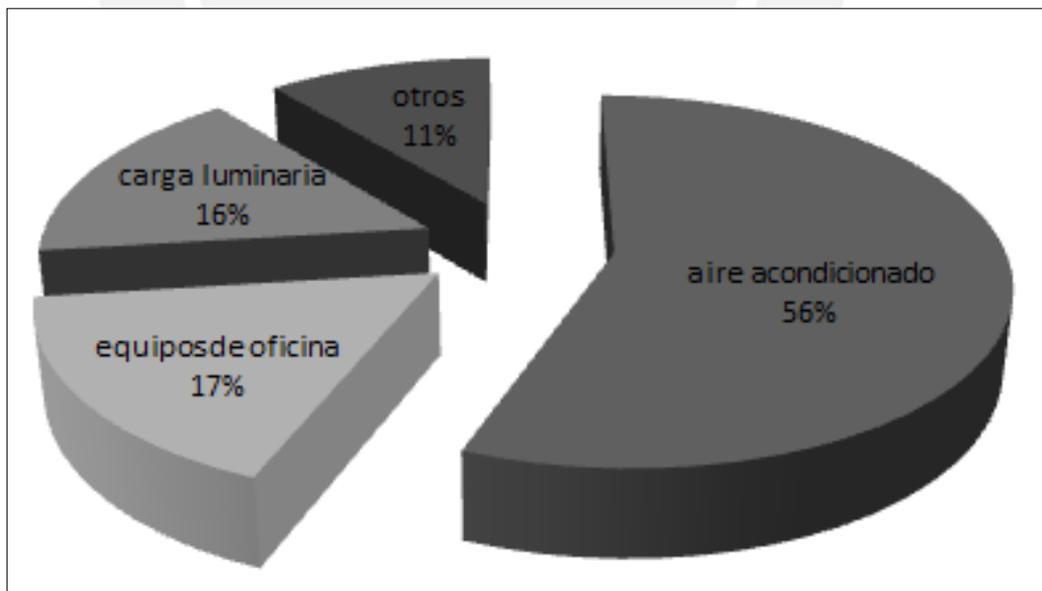


Figura 6.1 Porcentaje de uso de energía operativa en oficinas en Tailandia

Fuente: Adaptado de (Kofoworola, 2009)

En el estudio desarrollado por el Centro Mario Molina (2014), se repiten los altos porcentajes de utilización de energía primaria en la etapa de uso. Nuevamente, la fase de pre-uso es la segunda con mayor gasto de energía primaria; y la etapa de fin de vida con menos del 1% de consumo, relegada al último lugar. Los resultados se deben principalmente a los sistemas de enfriamiento, la energía eléctrica utilizada por los equipos, la carga luminaria, utilización de gas natural y otros factores que provocan gastos de energía primaria superiores en la fase del uso. Estos factores para la ciudad mexicana donde fue realizado el proyecto son mayores en comparación de la ciudad de Huancayo. Por ello, si bien la etapa de uso es la predominante en ambas, los porcentajes que estas alcanzan son marcadamente diferentes.

El estudio realizado por García (2014) comprende una edificación de 480 m² de tres niveles en la ciudad de Lima. Los resultados muestran, al igual que en los casos anteriores, que para el indicador de energía operativa, la etapa de mayor consumo es la de uso. Además, los porcentajes de participación de cada etapa se ajustan a los hallados en el presente proyecto (véase Tabla 6.2).

Las cantidades totales de energía operativa para cada fase del ciclo de vida son mayores en el caso de la vivienda en la ciudad de Lima; sin embargo, los porcentajes de participación son prácticamente los mismos. En el caso de la etapa del uso, la pequeña diferencia numérica entre ambas se debe a la cantidad de energía que utilizan los artefactos y equipos a lo largo del tiempo de vida. Además, la cantidad de energía en kWh y los metros cúbicos de gas natural que emplean anualmente son significativamente mayores para la vivienda de mayor área y que está enfocada al sector socioeconómico A (véase Tabla 6.3). Finalmente, la cantidad de energía primaria consumida por unidad de metro cuadrado en el presente proyecto es mayor a los encontrados para el estudio de García (2014).

Tabla 6.2 Consumo total de energía eléctrica y gas natural para dos viviendas unifamiliares

Material	Unidad	Vivienda de 130 m ²	Vivienda de 480 m ²
Energía eléctrica	kWh/año	4 800	3 000
Gas natural	m ³	216	180

Para el caso de la etapa de pre-uso, la principal diferencia numérica se debe a que el área del proyecto desarrollado por García es 3,7 veces mayor. En ese caso, tiene

tres niveles, frente a los dos niveles evaluados para el presente proyecto. Por ende, la cantidad de materiales utilizados para el proyecto de 480 m² será mayor al utilizado en este proyecto que tiene 130 m² (véase Tabla 6.3).

Tabla 6.3 Utilización de materiales para el desarrollo de dos viviendas unifamiliares

Material	Unidad	Vivienda de 130 m ²	Vivienda de 480 m ²
Concreto 20 MPa (flyash av)	m ³	100.00	417.23
Acero galvanizado	ton	0.23	0.23
Mortero	m ³	92.00	-
Clavos	ton	0.07	0.08
Acero, varillas, perfiles ligeros	ton	21.24	37.98
Madera blanda pequeña, seco en horno	m ³	2.33	2.90
Pintura látex en base a agua	L	348.76	1052.84

Esta es la principal razón por la que existe gran diferencia numérica entre ambas en la etapa de pre-uso: la energía primaria para la manufactura de estos materiales es mayor por la cantidad a producir. No obstante, los porcentajes en esta etapa de pre-uso son similares para ambos proyectos. Este es el resultado esperado, ya que se ha utilizado la misma matriz energética y las proporciones de gasto de energía primaria en ambos proyectos son los mismos.

La cantidad de concreto, acero y pintura utilizados son los materiales que presentan la mayor desigualdad. Esta es la principal razón por la que existen grandes diferencias numéricas entre ambas en la etapa de pre-uso, ya que estos productos son los que generan mayor consumo de energía primaria en esa fase. Esto se da porque, en el caso del acero, hay procesos de reducción en el horno alto, preparación del mineral, fundición, laminación y acabado, y utilización de combustibles para los hornos, calderas y centrales térmicas. Para el caso del concreto, las altas temperaturas a las que se calcina el cemento y la energía para la extracción de minerales son altas.

En el caso del análisis de la etapa de fin de vida, tampoco se encuentran grandes diferencias en los porcentajes de emisión. La fase de fin de vida incluye demolición de la construcción asociado al transporte y tratamiento de los materiales reciclables y no reciclables. Sin embargo, no se realiza un análisis profundo debido a que la contribución de esta es insignificante respecto a las otras dos etapas, lo cual es respaldado por otros estudios (Junnila y Horvath 2003; Ochoa et al. 2002).

Para las comparaciones del resto de indicadores ambientales se muestran las Tablas 6.4 y 6.5:

Tabla 6.4 Porcentaje de participación de las etapas de ciclo de vida por cada indicador ambiental en una vivienda tipo A en Lima

INDICADOR AMBIENTAL	ETAPAS DEL CICLO DE VIDA		
	PRE-USO	USO	FIN DE VIDA
POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL	58%	38%	4%
POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN MARINA	52%	47%	1%
POTENCIAL DE EFECTOS SOBRE LA SALUD	69%	30%	1%
POTENCIAL DE EUTROFIZACIÓN	85%	13%	2%
POTENCIAL DE SMOG	77%	20%	3%
CONSUMO DE COMBUSTIBLES FÓSILES	46%	51%	3%

En la Tabla 6.4, se muestran los porcentajes de participación de cada una de las etapas de ciclo de vida para el proyecto realizado por García. Para lograr una comparación entre ellos, en la Tabla 6.5 se muestran los porcentajes de participación para el presente proyecto.

Tabla 6.5 Porcentaje de participación de las etapas de ciclo de vida por cada indicador ambiental en la vivienda tipo B en Huancayo

INDICADOR AMBIENTAL	ETAPAS DEL CICLO DE VIDA		
	PRE-USO	USO	FIN DE VIDA
POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL	54%	43%	3%
POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN MARINA	46%	49%	5%
POTENCIAL DE EFECTOS SOBRE LA SALUD	81%	18%	1%
POTENCIAL DE EUTROFIZACIÓN	59%	32%	9%
POTENCIAL DE SMOG	75%	12%	13%
CONSUMO DE COMBUSTIBLES FÓSILES	41%	56%	3%

Para el potencial de calentamiento global, en ambos proyectos los porcentajes de participación de cada etapa son muy cercanos. En la etapa del pre-uso, específicamente en la fase de manufactura, se genera mayores emisiones de CO₂ que para la producción de energía en todo el tiempo de vida de la vivienda. La razón principal es la ausencia de sistemas de calefacción y refrigeración en este tipo de viviendas, ya que en ambas ciudades los climas no son severos.

Para sustentar esta afirmación se presenta el caso de un Análisis de Ciclo de Vida simplificado para una vivienda unifamiliar (adosado) de 222 m² en la ciudad de Zaragoza con una severidad climática importante, sobre todo en la estación de verano. Las cantidades emitidas de kgCO₂-equiv. para las etapas de pre-uso y uso son 41% y 59%, respectivamente (Zabalza, 2011).

En la figura mostrada, el sistema de calefacción emite casi el 71% de CO₂ hacia el medio ambiente en la etapa del uso, consolidándose como la actividad más importante. Asimismo, la refrigeración es la segunda actividad dentro de esta etapa en emitir mayor cantidad de CO₂ al medio ambiente, con el 22%. Finalmente, las emisiones que se generan al utilizar el agua caliente alcanzan el 7,3% del total de emisiones para esta etapa de uso.

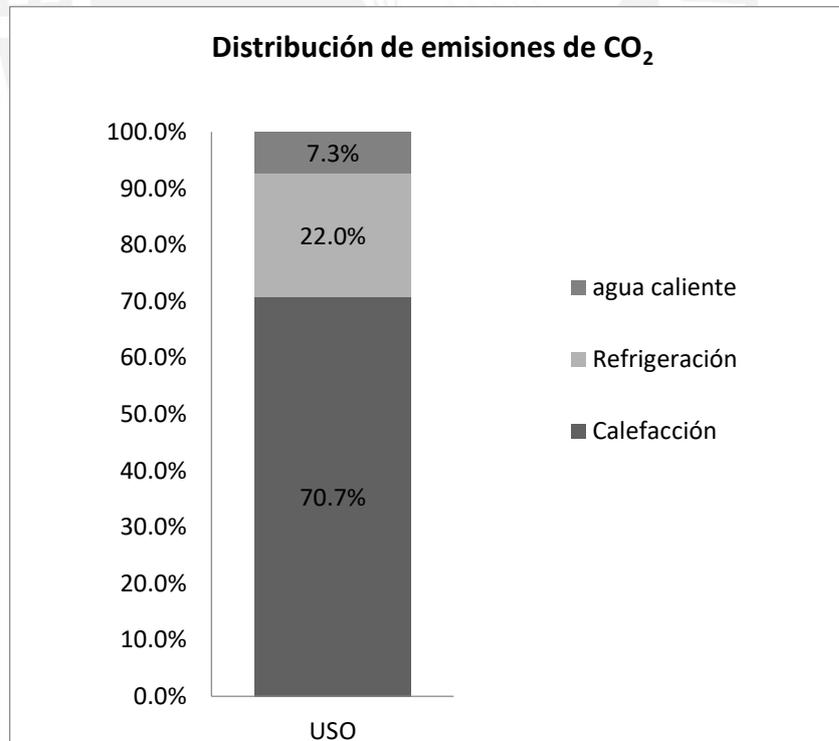


Figura 6.2 Distribución de emisiones de CO₂ en la etapa de uso

Fuente: Adaptado de Ignacio Zabalza Bribián (ECODISEÑO DE LA EDIFICACIÓN)

Para el resto de los indicadores presentados en este proyecto, se realizan las comparaciones con el estudio realizado por Samy García (2014).

En el caso de potencial de efectos sobre la salud, pese a que en el estudio realizado por García las unidades de los resultados son presentados en kg PM10-equiv., se pueden hacer comparaciones con los porcentajes de participación de cada etapa. En el mencionado estudio, la etapa del pre-uso representa el 69%, obteniendo así una diferencia del 11% respecto al valor hallado en este proyecto. Esta diferencia no es significativa, ya que la etapa de pre-uso en ambos estudios es la predominante, seguida de la etapa de uso y finalmente la etapa de fin de vida.

Para el caso del indicador de potencial de eutrofización, en comparación a los resultados presentados en el otro estudio, la etapa de pre-uso es más relevante, con 85%. La diferencia entre ambos porcentajes es significativa 26%. Esto debido al tipo de vivienda analizado en el otro proyecto, por la cantidad de recursos y la cantidad de emisiones de N-equiv. que provocan al medio ambiente. Finalmente, en ambos estudios, la etapa de fin de vida es la que menos potencia de eutrofización genera, con un porcentaje de alrededor del 9%.

De acuerdo a las Tablas 6.4 y 6.5, en ambas se repiten la intervención significativa de cada una de las etapas de ciclo de vida en el mismo orden de prioridad. Sin embargo, como es de esperar por las magnitudes diferentes de ambos proyectos y el tipo de construcción, las cantidades halladas para el presente proyecto son menores. La vivienda estudiada por García es una vivienda unifamiliar en la ciudad de Lima de nivel socioeconómico A y comprende un área de 478 m². Mientras que en el presente proyecto, el área de vivienda es 130 m² y está orientado a un nivel socioeconómico B en la ciudad de Huancayo.

Por ello, partiendo de estas premisas, los resultados obtenidos concuerdan con lo asumido inicialmente: que los porcentajes de intervención en cada uno de los indicadores para cada etapa del ciclo de vida sean muy parecidos al estudio realizado por García. La principal razón de ello es que se utiliza la misma matriz energética, ya que, si bien las unidades funcionales de ambas no son iguales, ambas son viviendas unifamiliares.

Además, se cumplió el objetivo principal que fue realizar el análisis de ciclo de vida para la vivienda tipo B en la ciudad de Huancayo y verificar cuáles son las etapas más importantes del ciclo de vida de una vivienda. Los resultados comprueban parcialmente la hipótesis, debido a que lo planteado se cumple solamente para dos

indicadores ambientales: uso de energía primaria y el potencial de acidificación marina. Sin embargo, en el resto de indicadores ambientales, la etapa del pre-uso surge como la etapa más importante. Asimismo, en la hipótesis se ignora la importancia de la etapa del pre-uso, hecho que los resultados del presente proyecto han refutado. La etapa del pre-uso contempla los materiales utilizados, la cantidad de los mismos y los procedimientos que se realizan para su manufactura.

Para el caso de la comparación entre los ladrillos de arcilla y bloques de concreto, pese a que las diferencias numéricas entre ambas no son considerablemente altas, la diferencia principal se da en el proceso de manufactura de los materiales. Esto debido a que el proceso de manufactura del cemento, que es el material principal para producir bloques de concreto, emite más contaminantes (CO_2 , N, SO_2 , $\text{PM}_{2,5}$, etc.) y consume más energía que al producir ladrillos de arcilla, por la temperatura de cocción que alcanza y la extracción de minerales.

No obstante, de acuerdo a los estudios realizados por Zabalza et al. 2011, existen alternativas al uso de ladrillos que generan menos emisiones de contaminantes. Por ello, a continuación se muestran los resultados que se aplican para 1 kg del material especificado (véase Tabla 6.6).

Tabla 6.6 Alternativas al uso de ladrillo y evaluación del impacto de ciclo de vida de 1 kg de ladrillo

MATERIAL	CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDAD	IMPACTO TOTAL
Ladrillo de Arcilla	Energía primaria	MJ	3.56
	Potencial de calentamiento global	kgCO ₂ -equiv.	0.27
Ladrillo de Arcilla Aligerada	Energía primaria	MJ	6.27
	Potencial de calentamiento global	kgCO ₂ -equiv.	0
Ladrillo sílico-calcáreo	Energía primaria	MJ	2.18
	Potencial de calentamiento global	kgCO ₂ -equiv.	0.12

Fuente: Adaptado de Ignacio Zabalza Bribián (ECODISEÑO DE LA EDIFICACIÓN)

El uso de los ladrillos de arcilla aligerada (compuestos por un 85% de arcilla y un 15% de paja) o de los ladrillos sílico-calcáreos (90% de cal y 10 % de arena) provocan una significativa disminución de impactos. Pese a que la cantidad de energía primaria es mayor en el ladrillo de arcilla aligerada, el 45% de esta energía es de origen biomásico, debido al contenido de paja.

Además, mediante este proyecto se busca fomentar el interés en el desarrollo de nuevos estudios con enfoque medioambiental en el rubro de la Ingeniería Civil. Es necesario que estas metodologías cobren fuerza en nuestro país, así como mitigar los impactos negativos que se están generando en el medio ambiente. Si bien el boom de la construcción se ha detenido actualmente, aún se pueden impulsar investigaciones en este rubro que mejoren la calidad ambiental de construcciones que se tiene en estos momentos.

Mediante lo expuesto en este proyecto se busca motivar la búsqueda de nuevos procedimientos, procesos y metodologías que integren problemas de rendimiento ambiental. Y, de esta manera, encontrar alternativas eficientes para el desarrollo de proyectos constructivos.



CAPITULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

El presente estudio de Análisis de Ciclo de Vida demostró la importancia que tiene la fase de uso, sobre todo en la cantidad de energía primaria consumida. Además, se verificó la importancia de la fase de pre-uso, debido a su porcentaje de participación significativo en cada uno de los ocho indicadores ambientales definidos para este proyecto. Si bien en estudios anteriores como los realizados por Junnila (2006) o Kahhat (2009), los porcentajes de participación eran menores para la etapa de pre-uso, esto se debió principalmente a las características del proyecto analizado (materiales empleados, uso de energía, entre otros) y la ubicación del mismo. Además, se verificó que la etapa de fin de vida genera impactos considerablemente inferiores al de las dos etapas antes mencionadas, ya que en ningún indicador superó el 15% de participación.

La etapa del uso es la fase que consume más cantidad de energía primaria y tiene mayor potencial de acidificación marina. Sin embargo, en el resto de indicadores ambientales la etapa del pre-uso surge como la etapa de mayor relevancia, principalmente en el potencial de efectos sobre la salud y potencial de *smog*. Esto se debe a los contaminantes que se generan en la etapa de manufactura de los materiales.

Aunque la etapa de fin de vida tiene un porcentaje de participación mínimo en todos los indicadores ambientales analizados, se deben de aplicar soluciones para su mitigación. Una opción sería la elaboración y aprobación de una ley de gestión de residuos de construcción, donde se contemple a los residuos y contaminantes dentro de un ciclo cerrado del proceso productivo; y donde además el producto final deba generar la menor cantidad de residuos y contaminantes.

Las condiciones climáticas, ambientales y sector económico al que está orientado un proyecto de construcción, definen la cantidad de energía primaria que se consume en dicho proyecto. Dado que el presente proyecto ha sido contemplado en un clima no adverso y enfocado a una vivienda tipo B, el consumo de esta energía es mucho menor a otros lugares con condiciones más adversas.

A partir los estos resultados encontrados, se hace notoria la necesidad de implementar alternativas tecnológicas que hagan posible, en primer término,

determinar la cantidad de contaminantes emitidos al medio ambiente y luego utilizar otras herramientas complementarias para mitigar los niveles de impacto. Por ejemplo, se puede reducir los impactos en la etapa de pre-uso, así como establecer metodologías para la reducción de consumo de energía en la etapa de uso, sin comprometer los principales objetivos con el que fue concebida la vivienda.

Las herramientas del ACV brindan grandes oportunidades con enfoque medioambiental. Asimismo, como en el caso de los tipos de tabiquería (ladrillo de arcilla o bloques de concreto), ayudan en la selección de proveedores de materiales, a encontrar soluciones constructivas y equipamientos energéticos adecuados, como los que fueron citados en este proyecto. Para este proyecto, con la utilización del *software Athena*, se consiguió realizar el Análisis de Ciclo de Vida y verificar las etapas más importantes del ciclo de vida y los impactos que generan. De esta manera, se plantean soluciones alternativas que van de acorde a la importancia de cada indicador ambiental.

Para el caso de los diferentes tipos de tabiquería, el estudio comprobó que, en todos los indicadores ambientales, el que genera menor impacto ambiental es el ladrillo de arcilla; sin embargo. Existen alternativas de mayor eficiencia, como el ladrillo de arcilla ligera o sílico-calcáreo, que generan menores cargas ambientales (Zabalza, 2011). Estas alternativas pueden ser utilizadas en nuestro país masivamente, ya que se cuenta con la materia prima para su manufactura.

RECOMENDACIONES

Luego de reconocer la importancia de nuevas alternativas para la disminución de uso de energía primaria, se puede implementar el uso de combustibles alternativos en la industria cementera. Esto con la intención de hacer una valorización energética de distintos tipos de residuos, que de otra forma acabarían en un vertedero o incineradora, ocasionando impactos ambientales más elevados. Además, se pueden implementar nuevas tecnologías en las plantas de fabricación de Clinker, como por ejemplo, el mejor aprovechamiento de los calores residuales del horno, la disminución de la temperatura de *clinkerización* y la implantación de la tecnología de lecho fluido. Estas medidas podrían llegar a suponer un gran ahorro potencial en energía primaria (Ignacio Zabalza, 2011).

Asimismo, dado que la utilización de acero incrementa el uso de la energía primaria por los procesos de manufactura que tiene, se puede proponer que los especialistas en ingeniería reduzcan la cantidad de acero empleado en las construcciones, sin que esto suponga una disminución en la seguridad estructural. Otra propuesta importante es la utilización de morteros alternativos al cemento, por ejemplo, los morteros de cal, ya que facilitan la transpiración de los edificios y absorben cantidades apreciables de CO₂ durante el proceso de fraguado (Kofoworola, 2009).

Como alternativas en la etapa de pre-uso, se puede establecer acuerdos a nivel internacional para eliminar las extracciones minerales y establecer incentivos al desarrollo de la industria secundaria de estos productos, que contribuiría a aumentar su reciclaje y dejar de producir materiales en exceso. Asimismo, para evitar mayor generación de PM_{2,5}, se puede aplicar políticas de eficiencia energética, y así promover el cambio de combustible de calefacción.

Finalmente, la aplicación de un ACV a un proyecto de construcción abre una ventana de posibilidades para la optimización de procesos y selección de materiales que pueden ser utilizados para orientar este sector a la preservación del medio ambiente. Estas posibilidades de investigación deben ser asumidas por cada ente involucrado, no solo la Ingeniería Civil, sino también todos los que están relacionados con el desarrollo constructivo en nuestro país (gobierno, empresas constructoras, etc.). Este reto que hoy presenta la construcción en nuestro país, debe de ser asumido responsablemente para fomentar la preservación del medio ambiente, mediante la búsqueda de alternativas y soluciones para una construcción más responsable e identificada con el desarrollo sostenible.

REFERENCIAS

- Aracelly S. Gallegos, B. L. (2006). CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS Y SUS POSIBLES EFECTOS SOBRE LA SALUD DE LOS NIÑOS DE ZONAS ALEDAÑAS. *Acta Nova*, 192-210.
- Arena, P. (2001). Spreading Life-Cycle Assessment to Developing Countries: Lessons from Argentina. *Journal of Industrial Ecology*, 3-6.
- ATHENA, I. (MAYO de 2003). *ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE*. Recuperado el MAYO de 2014, de <http://www.athenasmi.org/>
- Ayres, R. (1995). Life Cycle Analyses: A critique. *Resources, Conservation and Recycling*, 199-223.
- Ballester, F. (2005). Contaminación Atmosférica, Cambio Climático y Salud. *Revista Española De Salud Pública*, 229-242.
- Bartl, K. (2014). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN EL SECTOR CONSTRUCCIÓN. *CIVILIZATE*, 46-48.
- Baumann Henrike, T. A.-M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA*. Lund, Sweden: StudentLiteratur.
- Bilec, M. M., Ries, R. J., & Matthews, S. (SEPTEMBER de 2010). Life-Cycle Assessment Modeling of Construction Process for Buildings. *JOURNAL OF INFRASTRUCTURE SYSTEMS*, 327-336.
- Bishop, P. (2000). *Pollution Prevention: Fundamentals and Practice*. Long Grove: McGraw-Hill Science.
- Bongiovanni, R., & Tuninetti, L. (2015). *Avances y Estado de Situación en ACV y Huellas Ambientales en Argentina*. Córdoba, Argentina: INTA.
- Boustead, I. (1996). LCA- How it came about: The Beginning in the U.K. *LCA history*, 147-150.
- Bribián, I. (MAYO de 2015). *ECOHABITAR*. Recuperado el MARZO de 2015, de <http://www.ecohabitar.org/impacto-de-los-materiales-de-construccion-analisis-de-ciclo-de-vida/>
- Bribián, I. Z., Capilla, A. V., & Usón, A. A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 1133-1140.
- Brundtland, G. H. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. Oslo.
- Buyle, M., & Johan Braet, A. A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 379-388.

- Cabello, F. J. (24 de Setiembre de 2012). *LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y EL MEDIO AMBIENTE*. Recuperado el 5 de Junio de 2015, de HUESPEDES: http://huespedes.cica.es/gimadus/17/03_materiales.html
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Lyfe Cycle Assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 394-416.
- Centro Mario Molina. (MAYO de 2015). *Análisis de Ciclo de Vida: Edificaciones*. Recuperado el MARZO de 2015, de <http://centromariomolina.org/desarrollo-sustentable/analisis-de-ciclo-de-vida-edificaciones/>
- Chacón, R. (2008). Historia Ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV). *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería N° 72*, 37-70.
- Chehebe, J. (1998). *Análise do Ciclo de Vida de Produtos : Ferramenta Gerencial da Iso 14000*. Rio de Janeiro, Brasil: Qualitymark.
- Desideri, U., Arcioni, L., Leonardi, D., Cesaretti, L., Perugini, P., Agabiti, E., y otros. (2014). Design of a multipurpose “zero energy consumption” building according to European Directive 2010/31/EU: Life cycle assessment. *Energy and Buildings*, xxx-xxx (13).
- Ding, G. (2008). Sustainable Construction - The Role of the Environmental Assessment Tools. *Journal of Environmental Management*, 451-464.
- Ecobilan. (31 de 08 de 2002). *Life Cycle Assessment History*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2015, de PWC France Ecobilan: http://www.ecobilan.com/uk_lca02.php.
- EPA. (2012). Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts (TRACI) - User Manual.
- Fava, J. (2004). *Why Take a Life Cycle Approach?* Obtenido de https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/846Why_take_a_life_cycle_approach_EN.pdf
- Fay, R., & Iyer-Raniga, G. T. (2000). Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. *Building Research & Information* , 31-41.
- Fink, P. (1997). The Roots of LCA in Switzerland - Continuous Learning by Doing. *LCA History: How It Came About*, 131-134.
- Francoise Nemry, A. U. (2008). *Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings (IMPRO-Building)*. Sevilla: JRC Scientific and Technical Reports.
- García, S. (2014). *EVALUACIÓN AMBIENTAL DURANTE EL CICLO DE VIDA DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR*. LIMA: PUCP.
- GOBIERNO DE ESTADOS UNIDOS . (MAYO de 20015). *US. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION*. Recuperado el ABRIL de 2015, de <http://www.eia.gov/>

- Güereca, L., Ochoa, R., Gilbert, H., & Suppen, N. (2015). Life Cycle Assessment in Mexico: Overview of Development and Implementatio. *Springer*, 311-317.
- Guinée, J. B., Zamagni, A., & Ekvall, T. (2011). Life Cycle Assessment: Past, Present and Future. *Environmental Science Technology*, 90-96.
- Guinée, J., Marieke, G. R., Huppes, G., & Van Oers, I. (2001). *LCA - An operational guide to the ISO standards*. Leiden: Centre of Environmental Science.
- Hanssen, O. (1999). Status of Life Cycle Assessment (LCA) Activities in the Nordic Region. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 315-319.
- Hidalgo, I. (2005). Technological prospects and CO2 emission trading analyses in the iron and steel industry: A global model. *Science Direct*, 583-610.
- Ignacio Zabalza, A. A. (2011). *ECODISEÑO EN LA EDIFICACIÓN*. Zaragoza, España: Servicio de Publicaciones. Universidad de Zaragoza.
- International Standard Organization. (2006). *ISO 14040 - Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*.
- IPCC. (2013). *CAMBIO CLIMÁTICO 2007: Informe de Síntesis*. Ginebra-Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- J. Basbagill, F. F. (19 de November de 2012). Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *BUILDING AND ENVIRONMENT*, 81-92.
- Junnila, S. a. (2003). Life-Cycle Environmental Effects of an Office Building. *Junnila, S. and Horvath, A.*, 157-166.
- Junnila, S. H. (2006). Life-Cycle Assessment of Office Buildings in Europe and the United States. *Journal of Infrastructure Systems*, 10-17.
- Kahhat, R., Crittenden, J., Sharif, F., Fonseca, E., Li K., Sawhney, A., and Zhang, P. (2009). Environmental impacts over the Life Cycle of Residential Buildings Using Different Exterior Wall Systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 211-221.
- Kalakul, S., Malakul, P., Siemanond, K., & Gani, R. (2014). Integration of life cycle assessment software with tools for economic and sustainability analyses and process simulation for sustainable process design. *Journal of Cleaner Production*, 98-109.
- Karsten Voss, E. M. (2011). *NET ZERO ENERGY BUILDING*. Varennes, Canada: Detail Green Books.
- Kofoworola, O. F. (2009). Life cycle energy assessment of a typical office building in Thailand. *Energy and Buildings*, 1076-1083.

- Krogmann, N. M. (2008). *LIFE- CYCLE ASSESSMENT OF THE NEW YERSEY MEADOWLANDS COMISSION CENTER FOR ENVIRONMENTAL AND SCIENTIFIC EDUCATION BUILDING*. NEW YERSEY: RUTGERS.
- Life Cycle Engineering Experts GMBH. (2010). *ENVIRONMENTAL COMPARISON OF SPUN- CONCRETE COLUMNS AND COMPOSITE STEEL CLOMUNS*. Darmstadt: EURO POLES.
- Lindfors, L., & Hoffman, K. (1995). *Nordic Guidelines for Life Cicle Assessment*. Copenhagen, Dinamarca: Nordic Council of Ministers .
- Martínez, J., & Fernández, A. (2004). *Cambio Climático: Una Visión desde México*. Cuyacán - México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Masters, G. E. (2008). *Introducción a la Ingeniería Medioambiental*. Pearson Prentice Hall.
- McCaffrey, R. (2002). CLIMATE CHANGE AND THE CEMENT INDUSTRY. *ENVIRONMENTAL OVERVIEW* , 25-30.
- Meadows, D. (1972). *The limits to growth*. New York: Universe Books.
- Mercado, S. (2002). *INSTRUMENTOS DE GESTIÓN AMBIENTAL PARA EL SECTOR CONSTRUCCIÓN*. LIMA: FONDO EDITORAIL DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERÚ.
- MIT. (Mayo de 2012). *MIT Technology Review*. Recuperado el Junio de 2015, de <https://www.technologyreview.es/energia/40410/un-nuevo-metodo-para-fabricar-cemento-podria/>
- Morales-Mendoza, L. F., & Catherine Azzaro-Pantel, J.-P. B. (2012). *An integrated approach combining process simulation and life cycle assessment for eco-efficient process design*. London: Elsevier B.V.
- Moreno, D., & Quintero, J. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS* , 25-33.
- Nina Khanna, J. K. (2014). QUANTIFYING PM2,5 EMISSIONS FROM CHINA'S BUILDING SECTOR AND CO-BENEFITS OF ENERGY EFFICIENCY. *SUMMER STUDY ON ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS*, 404-416.
- NTC-ISO 14040. (1997). *Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework*.
- Ochoa, L. H. (2002). Economic input-output lifecycle assessment of U.S. residential buildings. *J. Infrastruct. Syst*, 132-138.
- Ooteghem, K. V., & Xu, L. (2012). The life-cycle assessment of a single-storey retail building in Canada. *Building and Environment* , 212-226.

- Ortiz, O., Francesc, C., & Guido, S. (2010). Life Cycle Assessment of Two Dwellings: One in Spain, a Developed Country, and One in Colombia, a Country Under Development. *Science of the total Environment*, 2435-2443.
- Oyarzo, J., & Peupartier, B. (2014). Life cycle assessment model applied to housing in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 109-116.
- Peña, C. C.-P. (6-7 de Marzo de 2008). The 6th Workshop on LCA for APEC Members. Tokio .
- Raven, J. e. (2005). *Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide*. The Royal Society .
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., & Rydberg, T. (2004). Life cycle Assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis and applications. *Environment International*, 701-720.
- Red Peruana de Ciclo de Vida. (2011). *ESTUDIO DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE BIOCOMBUSTIBLES EN PERÚ*. Lima, Perú: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.
- Red Peruana de Ciclo de Vida. (2011). *Red Peruana de Ciclo de Vida*. Obtenido de <http://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/index.php/es/publicaciones/category/4-1.html>
- Red Peruana de Ciclo de Vida. (2013). *Estudio de Análisis de Ciclo de Vida de Ladrillo y Bloques de Concreto en San Jerónimo - Cusco*. Obtenido de http://www.redladrilleras.net/documentos_galeria/Ciclo%20de%20vida.pdf
- Red Peruana de Ciclo de Vida, A. (MAYO de 2013). *RED PERUANA DE CICLO DE VIDA*. Recuperado el JULIO de 2014, de <http://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/>
- Reed, D. (2012). *Life-Cycle Assessment in Government Policy in the United States*. Knoxville: Trace: Tennessee Research and Creative.
- Rita Puig, L. M. (1999). EL ACV Y SU UTILIZACIÓN EN EL ECOETIQUETAJE DE PRODUCTOS: APLICACIÓN DEL SECTOR CURTIDOS. *Escuela Superior de Tenaria*, 240-245.
- Roodman D.M., y Lenssen, N. (1995). *A Building Revolution: How Ecology and Health Concerns are transforming Construction*. Washington D.C.: Worldwatch Paper 124.
- Rossi, B., Marique, A.-F., Glaumann, M., & Reiter, S. (2012). Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool. *Building and Environment* , 395-401.
- Seo, E., & Kulay, L. (2006). AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA: FERRAMENTA GERENCIAL PARA TOMADA DE DECISÃO. 23.
- Sharrard, A. L., Matthews, H. S., & Ries, R. J. (2008). Estimating Construction Project Environmental Effects Using an Input-Output-Based Hybrid Life-Cycle Assessment Model. *JOURNAL OF INFRASTRUCTURE SYSTEMS*, 327-336.

- T.E. Graedel, B. A. (2010). *INDUSTRIAL ECOLOGY AND SUSTAINABLE ENGINEERING*. Uper Sadle River: Prentice Hall.
- Takano, A., Winter, S., Winter, S., & Linkosalmi, L. (2014). Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. *Building and Environment*, 20-30.
- Tsai, W.-H., Yang, C.-H., Chang, J.-C., & Lee, H.-L. (2014). An Activity-Based Costing decision model for life cycle assessment in green building projects. *European Journal of Operational Research*, 607-619.
- UNEP. (1996). *Life Cycle Assessment: What is and How to Do It*. Paris.
- UNEP. (1999). *Towards the Global Use of Life Cycle Assessment*. United Nations Environment Program. Division of Technology, Industry and Economics.
- UNEP. (2013). *An Analysis OF Life Cycle Assessment in Packaging for Food & Beverage Applications*. United Nations Environment Program and SETAC.
- USEPA. (2000). *United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el MARZO de 2015, de <http://www.epa.gov/>
- VIDA, R. I. (MARZO de 2015). *RED IBEROAMERICANA DE CICLO DE VIDA* . Recuperado el JULIO de 2014, de <https://rediberoamericanadeciclodevida.wordpress.com/>
- VV.AA., A. S. (2009). *ENERGY EFFICIENCY GUIDE FOR EXISTING COMMERCIAL BUILDINGS: THE BUSINESS CASE FOR BUILDING OWNERS AND MANAGERS*. USA: AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGE.
- Warm Version 13. (Marzo de 2015). CLAY BRICKS. EE.UU.
- Werner, F. (2005). *Ambiguities in Decision-Oriented Life Cycle Inventories: The Role of Mental Models and Values*. Zurich: Springer.
- WMO. (2007). *WMO statement on the status of the global climate in 2007*. Ginebra.
- Young, S. (2003). Life Cycle Assessment in Canada. *Environment and Business* , 321-322.
- Zabalza, I. (2011). *Ecodiseño en la Edificación*. Zaragoza-España: Agapea.
- Zabalza, I., Aranda, A., & Scarpellini, S. (2009). Life Cycle Assessment in Buildings: State-of-the-art and Simplified LCA Methodology as a Complement for Building Certification. *Building and Environment*, 2510-2520.
- Zapata, P. a. (2005). Energy Consumption of Asphalt and Reinforced Concrete Pavement Materials and Construction. *Journal of Infrastructure Systems*, 9-20.
- Zhang, X., Shen, L., & Zhang, L. (2013). Life cycle assessment of the air emissions during building construction process: A case study in Hong Kong. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160-169.