

**Análisis ambiental de una vivienda con énfasis en
aprovechamiento de recursos locales (guadua) y gestión de
recursos hídricos no convencionales.**

Manuel Tiberio Flórez Calderón

**Facultad de Ciencias Ambientales
Maestría en Ciencias Ambientales
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira
2016**



Análisis ambiental de una vivienda con énfasis en aprovechamiento de recursos locales (guadua) y gestión de recursos hídricos no convencionales.

Manuel Tiberio Flórez Calderón

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ciencias Ambientales

Director

Ph.D. Tito Morales Pinzón

Grupo de Investigación en Gestión Ambiental Territorial - GAT

Facultad de Ciencias Ambientales

Maestría en Ciencias Ambientales

Universidad Tecnológica de Pereira

Pereira

2016

DEDICATORIA

Este proceso y etapa de mi vida la dedico a mis hijos Juan Miguel y Nicolás, la expresión de Dios en mi vida; el universo en sus ojos y sonrisa, pues son ellos la razón, la esperanza, la fuerza y motivación; para creer en lo que hacemos juntos cada día.

A mi esposa Iris por nunca dejar de esperar lo mejor de mí, por enseñarme a buscarlo a través del ejemplo y su inagotable afecto.

A mis padres y hermanos, pues siempre son mi más alto orgullo y ejemplo.

A mis amigos Michael Rave, Yuliana Montoya, Juan David Céspedes, María Isabel García, Iris Orozco y Tito Morales; por compartir la pasión y compromiso con aquello que nosotros denominamos Ambiente, por su generosidad, palabras de aliento, y por enseñarme a pensar en el bien común y en que vale la pena intentarlo.

Y a los estudiantes que a diario acompañan mi camino y aprendizaje en las Ciencias Ambientales, por ayudarme a comprender y a no dejar de sorprenderme al encontrar las preguntas adecuadas, y compartirlas sin mesura.

AGRADECIMIENTOS

Extiendo mi agradecimiento al Grupo de Investigación en Gestión Ambiental Territorial – GAT, y a su proyecto "Metabolismo urbano y Análisis ambiental del aprovechamiento de agua no convencional en edificaciones Más Sostenibles" Financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión, de la Universidad Tecnológica de Pereira; por proporcionar un escenario de investigación formativa para el desarrollo de este estudio.

Agradezco al profesor Tito Morales Pinzón por su siempre dispuesto interés por compartir sus conocimientos, involucrar y convertir los temas de investigación en temas de importancia para la vida misma.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	11
1.1	Formulación del problema	11
1.2	Justificación	13
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo General	16
2.2	Objetivos Específicos.....	16
2.2.1	Objetivo 1:.....	16
2.2.2	Objetivo 2:.....	16
2.3	Hipótesis.....	16
3	MARCO TEÓRICO	17
3.1.1	Desarrollo y Sostenibilidad	17
3.1.2	Producción y Consumo en la vivienda social.....	19
3.1.3	Los recursos naturales locales, no convencionales y alternativos	20
3.1.4	La vivienda social en Colombia, y la vivienda sostenible	22
4	ESTADO DEL ARTE.....	24
4.1	EXPERIENCIAS EN EL USO DEL AGUA DE LLUVIA EN COLOMBIA	24
4.2	USOS DOMÉSTICOS DEL AGUA NO CONVENCIONAL	24
4.3	MÉTODOS GENERALES PARA ESTIMAR EL POTENCIAL HÍDRICO NO CONVENCIONAL.....	25
4.4	MODELACIÓN DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA NO CONVENCIONAL	26
4.5	Eficiencia energética en la producción y distribución de agua de red.....	27
5	METODOLOGÍA	29
5.1	Metodología - Objetivo Específico 1	30
5.1.1	La definición del objetivo y alcance,.....	30

5.1.2	Los límites del sistema.	30
5.1.3	El análisis de inventario	32
5.1.4	Evaluación de impacto.....	33
5.1.5	Metodología - Objetivo Específico 2.....	36
6	RESULTADOS.....	38
6.1	Impactos ambientales potenciales de la vivienda por el uso del agua de red y agua no convencional.....	38
6.1.1	Impactos ambientales potenciales por el uso de agua de red en Pereira.	38
6.1.2	Impactos ambientales potenciales de la vivienda con sistema de reutilización de aguas grises.	42
6.1.3	Impactos ambientales potenciales de la vivienda con sistema de cosecha de agua lluvia.....	44
6.1.4	Impactos Ambientales potenciales en la vivienda integrando agua doméstica y no convencional.	46
6.2	Impactos ambientales potenciales de la vivienda por el uso de materiales locales (Guadua).....	47
6.3	Aproximación al impacto ambiental potencial del aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales y el uso de materiales locales (guadua) en la construcción de nueva vivienda a escala barrial.	53
6.3.1	Escala de análisis barrial en la vivienda social de la ciudad de Pereira. ..	53
6.3.2	Proyección del impacto ambiental potencial del aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales y el uso de materiales locales (guadua) en la construcción de nueva vivienda a escala barrial.	59
7	CONCLUSIONES	62
8	RECOMENDACIONES.....	64
9	BIBLIOGRAFÍA.....	66

Índice de Figuras

Figura 1. Potencial de calentamiento global por el uso de agua de red en sistemas de distribución con y sin bombeo.	40
Figura 2. Impactos ambientales potenciales por el uso de agua de red y consumo energético para bombeo de agua.	41
Figura 3. Impacto ambiental comparado. Uso de agua gris vs agua de red en la vivienda.	43
Figura 4. Impactos ambientales potenciales en la fase de construcción de la vivienda convencional y la vivienda más sostenible.	49
Figura 5. Impactos ambientales potenciales en la fase de uso de la vivienda convencional y la vivienda más sostenible.	50
Figura 6. Impactos ambientales potenciales en la fase de deconstrucción de la vivienda convencional y la vivienda más sostenible.	51
Figura 7. Impactos ambientales potenciales en el ciclo de vida de la vivienda convencional y la vivienda más sostenible.	52
Figura 8. Dendograma combinación de conglomerados a partir de variables de la vivienda social en la ciudad de Pereira (con estandarización de variables).	55
Figura 9. Dendograma combinación de conglomerados a partir de variables de la vivienda social en la ciudad de Pereira (sin estandarización de variables).	56
Figura 10. Dendograma conglomerados barriales de vivienda social en la ciudad de Pereira.	57
Figura 11. Potenciales impactos ambientales por emisión de gases efecto invernadero de los proyectos habitacionales a escala barrial constituidos por viviendas unifamiliares y considerando el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales.	59
Figura 12. Potenciales impactos ambientales por emisión de gases efecto invernadero de los proyectos habitacionales a escala barrial constituidos por viviendas unifamiliares considerando el uso de materiales locales de construcción y el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales.	60
Figura 13. Potencial de calentamiento global evitado en los proyectos habitacionales a escala barrial constituidos por viviendas unifamiliares considerando el uso de materiales locales de construcción y el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales.	61

Índice de Tablas

Tabla 1. Modelos para evaluar sistemas de aprovechamiento de agua no convencional	27
Tabla 2 - Materiales y procesos utilizados según tipología de vivienda de 45 m ²	31
Tabla 3. Unidades habitacionales de vivienda social en las comunas y barrios de la ciudad de Pereira.....	36
Tabla 4. Aumento en los Impactos ambientales potenciales por el uso de sistemas de bombeo en la distribución y uso de agua de red en la vivienda.....	41
Tabla 5. Valores de diseño para simular el sistema de aprovechamiento de agua no convencional.	42
Tabla 6. Impactos ambientales potenciales por el uso de agua gris en la vivienda sin sistemas de bombeo.....	43
Tabla 7. Impactos ambientales potenciales por el uso de agua lluvia en la vivienda sin sistemas de bombeo.....	44
Tabla 8. Impactos Ambientales potenciales en la vivienda integrando agua doméstica y no convencional.	46
Tabla 9. Impactos totales del ciclo de vida de la vivienda convencional y la vivienda más sostenible (incorporando uso de agua no convencional y materiales locales como la Guadua)	48
Tabla 10. Impactos totales ciclo de vida de las viviendas convencional y más sostenible.	52
Tabla 11. Categorías de análisis y parámetros considerados para la estimación a escala barrial del potencial de impacto ambiental.	54
Tabla 12. Clúster para el análisis de datos barriales según variables de la vivienda social en la ciudad de Pereira.	56
Tabla 13. Tamaño promedio de los conglomerados barriales según el número de viviendas.	57
Tabla 14. Correlación de las variables analizadas en la vivienda social a escala barrial.	58

Índice de Imágenes

Imagen 1. Viviendas sociales objeto de estudio, construidas con materiales locales (Guadua) en el eje cafetero.....	32
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Resumen

En la actualidad existen pocas investigaciones sobre el análisis ambiental del aprovechamiento y reutilización de recursos locales, excedentarios y/o alternativos en la construcción y uso de la vivienda. Estas investigaciones son necesarias para potenciar el desarrollo de viviendas más sostenibles, desde la adopción y reconocimiento de estrategias locales, innovadoras y de relativa simplicidad.

En la vivienda, el uso de agua no convencional (pluvial, gris) en diferentes escalas urbanas (unidad habitacional, edificio, barrio y ciudad) puede constituir una estrategia que contribuya al cierre del ciclo del agua en las áreas urbanas, promoviendo alternativas de suministro con menor impacto ambiental que la oferta del agua de red centralizada. Al respecto el uso de agua no convencional en áreas urbanas todavía enfrenta diversos obstáculos, puesto que a la fecha no existen instrumentos normativos en el país que obliguen al uso de estas fuentes de recursos aprovechables y renovables en la construcción de nuevas edificaciones. Esto a pesar de la existencia de criterios institucionales, técnicos y de calidad que permiten valorar su pertinencia técnica, social y ambiental, para el uso del agua, el suelo, los materiales y la energía en la vivienda urbana.

Por otro lado, materiales locales como la Guadua angustifolia Kunth hacen parte de edificaciones consideradas hoy como patrimoniales en los sistemas constructivos del Eje Cafetero, sin embargo, actualmente no se cuenta con suficientes investigaciones que permitan estimar la importancia de su uso como estrategia para la generación de viviendas sociales más sostenibles y su potencial uso en áreas urbanas.

La vivienda en Colombia y en especial la vivienda social ha sido un tema prioritario para los gobiernos de los últimos períodos; sin embargo, es necesario tener en cuenta que hogares más sostenibles con menor impacto ambiental, deben utilizar materiales locales en sustitución de materiales convencionales.

A partir de estas necesidades, la presente investigación tiene como objetivo evaluar los posibles impactos ambientales que pueden evitarse a partir de una vivienda social con énfasis en el uso de recursos locales como la guadua en su fase de construcción y el aprovechamiento de recursos excedentarios como el agua de lluvia y aguas grises en la fase de uso. Como unidad de análisis, se seleccionó una vivienda social real en la ciudad de Pereira; construida por un programa de vivienda institucional hace 15 años.

Como resultados, se ha encontrado que el uso de los materiales locales en la fase de construcción de la vivienda, combinado con el uso de recursos hídricos no convencionales (agua de lluvia, aguas grises) para uso doméstico no potable, puede contribuir a un menor potencial de impacto ambiental; relacionado con una importante disminución del potencial total de las emisiones de gases de efecto invernadero comparado con una vivienda social convencional.

Además, el uso de materiales locales, y el excedente de agua de lluvia y grises durante el ciclo de vida de la vivienda de baja densidad contribuye a emitir menos gases de efecto invernadero; constituyendo una posible estrategia de adaptación y mitigación territorial al cambio climático.

Como herramientas metodológicas, se aplica el análisis de Ciclo de Vida – ACV- del aprovechamiento de los recursos locales para la construcción y los hídricos no convencionales en la vivienda; la evaluación ambiental de su aprovechamiento potencial, la aproximación al análisis de los impactos derivados de esto y su representación a escala barrial.

Palabras clave: **Recursos excedentarios, Guadua, agua de lluvia, aguas grises, sistemas urbanos, vivienda**

Abstract

At present there is little research on the environmental analysis of the use and reuse of local resources, surplus and / or alternative in the construction and use of housing. These investigations are necessary to enhance the development of more sustainable housing, since the adoption and recognition of local, innovative strategies and relative simplicity.

In housing, the use of unconventional water (rain, gray) in different urban scales (housing unit, building, neighborhood and city) may be a strategy that contributes to closing the water cycle in urban areas, promoting supply alternatives with less environmental impact than water supply centralized network. About, the use of unconventional water in urban areas still faces several obstacles. To date, there are not legislative instruments in the country requiring the use of these renewable sources of exploitable and construction of new buildings. Despite the existence of institutional, technical and quality criteria for assessing their technical, social and environmental relevance, for the use of water, land, materials and energy in urban housing.

Also, local materials such as *Guadua angustifolia* Kunth are part of buildings considered today as property in the building systems at Eje Cafetero, however, currently it doesn't have enough research to estimate the importance of its use as a strategy for generating more sustainable social housing and its potential use in urban areas.

Housing in Colombia and especially social housing has been a priority for governments in recent periods; however, it's necessary to consider more sustainable homes with less environmental impact, these should use local materials and replace conventional materials.

From these needs, this research aims to assess the potential environmental impacts that can be avoided from in a social housing with an emphasis on using local resources such as bamboo in it's construction phase and the use of surplus resources as rainwater and greywater in the use phase.

As the unit of analysis, a real social housing was selected in the city of Pereira; built by a program of institutional housing 15 years ago.

As a result it was found that the use of local materials in the construction phase of housing, combined with the use of non-conventional water resources (rainwater, gray water) for undrinkable domestic use, may contribute to a lower potential environmental impact; associated with a significant decrease in total potential of Co₂ emissions compared to a conventional social housing.

Also, the use of local materials, and surplus rainwater and gray during the life cycle of low density housing contributes to emit less Co₂; constituting a possible adaptation strategy and territorial climate change mitigation.

As methodological tools, the life-cycle assessment applies - ACV the use of local resources for construction and non-conventional water resources at housing; environmental assessment of it's potential use, the approach to the analysis of the impacts of this and their representation at the neighborhood scale.

Keywords: **Resources surplus, bambú, rainwater, gray water, urban systems, housing**

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación del problema

Actualmente, en Latinoamérica las áreas urbanas se están expandiendo y el acelerado proceso de urbanización se enmarca como un hecho sin precedentes a nivel mundial. Se estima que casi el 80% de su población vive actualmente en ciudades (ONU-Hábitat, 2012).

El paso de la vivienda rural a la urbana implica nuevas necesidades y claramente un cambio importante en las pautas de consumo. La población cambia sus hábitos, aumentan sus demandas de recursos y además lo hace desde escenarios mucho menos sostenibles (Pengue, 2009), constituyendo nuevas problemáticas ambientales.

La sostenibilidad de las ciudades, entendida ésta, como el aprovechamiento y uso eficiente de los recursos naturales y la reducción de la generación de residuos con el fin de mejorar la calidad de vida y condiciones de habitabilidad, generando sistemas urbanos que se ajustan a las capacidades de los ecosistemas locales, regionales y globales (Newman, 1999), se plantea como un proceso que busca la resolución o mejora de las situaciones problemáticas relacionadas con los sistemas urbanos.

En la actualidad existen pocas investigaciones sobre el aprovechamiento de recursos locales y excedentarios en las ciudades colombianas, vistas como una estrategia de sostenibilidad desde la construcción y uso de la vivienda, y son todavía menos aquellas que inciden sobre la problemática de los recursos hídricos desde la perspectiva de transición hacia el desarrollo sostenible a escala urbana, en el marco de la variabilidad y cambio climático.

Esta problemática se agudiza con el aumento de la población en estas áreas, donde planificadores y gestores se enfrentan a la dificultad de abastecer con calidad y suficiencia el recurso hídrico necesario para el desarrollo de las ciudades, bien sea por el requerimiento de nueva infraestructura o por la escasez e irregularidad en la oferta del recurso.

La oferta de recursos hídricos procedentes de fuentes no convencionales como las aguas pluviales y aguas grises regeneradas, a nivel local no son irrelevantes y podrían ser considerados como recursos excedentarios, donde su óptimo aprovechamiento podría solucionar algunas de las problemáticas ya mencionadas. Al respecto, se dispone de pocos datos científicos sobre la calidad de las aguas pluviales en ciudades colombianas debido a su insuficiente caracterización fisicoquímica y biológica, cuantificación y evaluación ambiental.

Las distintas cubiertas y superficies con potencial de captación (tejados, calles, aparcamientos, entre otros) pueden captar agua de escorrentía de una calidad y cantidad distinta. De forma complementaria, la reutilización de aguas grises podría incrementar la eficiencia en la utilización del recurso hídrico urbano, sin embargo, la bondad a priori de su aprovechamiento debe ser demostrada con datos científicos.

Otro factor determinante en la transición hacia la sostenibilidad de los sistemas urbanos está relacionado con los materiales para la construcción de la vivienda. Estos materiales vienen representando productos con un considerable consumo de recursos y energía, ocasionando un problema a escala global, relacionado con el nivel de emisiones de CO₂ en todas las etapas del ciclo de vida de las viviendas, entre otros elementos contaminantes del ambiente que podrían incluso afectar la salud humana.

Escamilla y Habert. (2014), al respecto han planteado la necesidad del desarrollo y aprovechamiento de materiales de construcción con base "Bio," los cuales tienen la ventaja de ser además de renovables, capaz de secuestrar CO₂ durante su desarrollo (o crecimiento) y favorecer un menor impacto en la fase de uso. Estos autores, ponen en consideración al bambú, como uno de los materiales de base biológica más importante en el mundo.

La *Guadua angustifolia* Kunth es uno de los bambúes más grandes y económicamente más importantes en el mundo, esta tiene su hábitat natural en Colombia, jugando un importante rol en los usos domésticos y materiales de construcción de las comunidades rurales y urbanas del eje cafetero colombiano. (Camargo, J.C.; Morales T.; Garcia, J.H. 2007). Es preciso en función de la oferta de estos recursos locales y excedentarios, una configuración de sus posibles usos desde una perspectiva de ecoeficiencia en el diseño y rediseño de nuestras ciudades, como estrategia para la reducción del consumo de recursos y la adaptación al cambio climático. Es importante aclarar que la concepción de ecoeficiencia no solo involucra la producción limpia, la gestión ambiental, la reducción de uso de recursos naturales o la reducción de las emisiones de CO₂; su componente principal, y a la vez, el componente que le relaciona con la sostenibilidad de las ciudades, es la productividad que genera esta acción ambiental basada en la reducción de emisiones y el mejoramiento de la calidad de vida, que trae consigo la inclusión social y la seguridad humana. (Naciones Unidas, 2011)

Se trata entonces de una problemática que involucra componentes determinantes del desarrollo urbano, siendo estos, el consumo de agua y el uso de materiales para la construcción; donde cobra interés la solución al interrogante sobre: ¿El aprovechamiento de materiales locales y recursos excedentarios, pueden contribuir en una potencial reducción a la presión ejercida sobre los recursos naturales, por el desarrollo de los sistemas urbanos convencionales, en escenarios tendenciales de disminución de la oferta natural y del crecimiento en la demanda?

1.2 Justificación

Según lo plantea González (2007), las Ciencias Ambientales constituye un puente entre diversas ciencias, generando nuevos campos de conocimiento con el único propósito de ser aplicadas en lo que consideramos ambiente y sus complejas problemáticas, a partir del desarrollo de nuevas y la adaptación de actuales teorías, metodologías, técnicas e instrumentos, que sumados constituyan un aporte al paradigma de la sustentabilidad. La Maestría en Ciencias Ambientales busca formar investigadores y gestores que tengan la capacidad de proponer alternativas de solución a las problemáticas ambientales hacia el desarrollo sostenible¹.

Esta propuesta, atiende dos de las tres líneas énfasis de la Maestría en Ciencias Ambientales, la Producción más Limpia y la Gestión Ambiental Territorial; la primera por el objeto de estudio y la segunda por las implicaciones ambientales que tiene su conocimiento. La producción más limpia aporta a este proyecto de trabajo de grado desde sus enfoques teóricos, conceptuales y metodológicos, donde conforme lo define la Facultad de Ciencias Ambientales, se busca una aplicación permanente de estrategias ambientales preventivas integrada a procesos, productos y servicios en procura de la minimización de los riesgos humanos y medioambientales, siendo esto pertinente desde el conocimiento de los impactos ambientales. La Gestión Ambiental Territorial, dada la escala de los estudios que constituyen esta propuesta, aporta a la capacidad de comprender e intervenir sustentablemente la ocupación, uso y transformación del territorio, permitiendo la articulación de los resultados en función de la dimensión espacio-temporal que integra sistemas biofísicos y socio-culturales en donde confluyen problemáticas y potencialidades ambientales. La Maestría en Ciencias Ambientales define desde esta línea la sustentabilidad como cambio cultural, a partir del conocimiento del territorio.

De igual manera, vale la pena mencionar que este proyecto aborda de manera indirecta aspectos culturales como el rescate y salvaguarda de materiales y técnicas tradicionales como alternativa a la construcción convencional. El conocimiento generado a partir del análisis ambiental de sistemas construidos como la vivienda y su uso posterior, representa un aporte importante a las soluciones de problemáticas y aprovechamiento de potencialidades relacionadas con el uso de recursos excedentarios, locales y no convencionales en las sociedades actuales, el desarrollo urbano, y su impacto en el consumo de recursos convencionales.

Esta investigación se enfoca entonces en los impactos ambientales de la vivienda urbana relacionados con el uso de materiales de construcción y consumo de agua,

¹ Maestría en Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira. Tomado del sitio web institucional: <http://ambiental.utp.edu.co/maestrias/ciencias-ambientales/>

siendo uno de las más relevantes la emisión de gases efecto invernadero, el cual constituye un importante factor para la mitigación del cambio climático en Colombia.

Según la “Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional - INDC del MADS (2015) y el “ABC de los Compromisos de Colombia para la Cop21 de García et al (2015), Colombia es responsable del 0.46% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global, según datos de 2010. Sin embargo, esta participación tiene tendencia a crecer. Se calcula que, si no se toman medidas, las emisiones podrían aumentar cerca de 50% en 2030. Actualmente, las emisiones acumuladas entre 1990 y 2012 sitúan a Colombia entre los 40 países con mayor responsabilidad histórica en la generación de emisiones de gases de efecto invernadero.

Morales-Pinzón et al. (2014c), realizan una evaluación de los aspectos de sostenibilidad y el uso de materiales locales para la construcción de viviendas en Colombia; donde la apropiación de tecnologías y materiales en el proceso de construcción ha demostrado una reducción significativa de las cargas ambientales durante el ciclo de vida de la vivienda; encontrando que el uso de fuentes alternativas de agua no convencional (agua de lluvia, aguas grises) para uso doméstico puede representar una reducción de 0,28 kg CO₂ eq./m³ de agua del grifo reemplazado. Resultado que sumado al uso de materiales locales, como el bambú (guadua) en casas de tipología unifamiliar puede reducir los impactos ambientales potenciales hasta un 26% durante el ciclo de vida de la vivienda (31,2 kg CO₂ eq. /m²) y aumentar el empleo local. Morales-Pinzón et al. (2014c) concluyen que *“el uso de materiales locales como bambú, ladrillo y teja de barro, y el uso de los recursos excedentarios como el agua de lluvia debe ponderarse con altos valores de importancia en la definición de estándares de sostenibilidad de la vivienda en los países en desarrollo. Su inclusión en la política pública de vivienda social puede ser una estrategia que perdura en el tiempo, más allá de la concepción limitada de materiales locales y el uso de los excedentes es una apuesta sólo para la población de menores ingresos”*, argumentando además que las viviendas construidas con materiales locales y el bajo coste económico tienen un menor impacto ambiental, incluso en las zonas urbanas donde predomina el uso de materiales convencionales y nuevos materiales (que no involucran materiales tradicionales o locales).

Es importante mencionar que el análisis ambiental, representado por la evaluación de una vivienda con énfasis en el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales y el uso de recursos locales para su construcción; como estrategias para la sostenibilidad urbana en el marco de la adaptación y mitigación territorial al cambio climático; se da en un contexto en el que existe poca información a escala local sobre el aprovechamiento de este tipo de recursos, lo que representa una baja comprensión del sistema. Una mejora en su comprensión implica el análisis a lo largo de todo el ciclo de vida de la vivienda.

El desconocimiento de los aspectos que se plantea analizar, podría llegar a materializar escenarios de baja disponibilidad, como es el caso del abastecimiento de la demanda

de agua potable, la cual enfrenta la evidencia de una cada vez mayor escasez del recurso (Naciones Unidas, 2007). En este contexto la evaluación del aprovechamiento potencial de recursos no convencionales que reduzcan la presión sobre las fuentes de agua potable podría representar un enfoque alternativo para la gestión sostenible de recursos naturales como el agua y el cierre de sus ciclos urbanos.

La Guadua, se constituye en Risaralda como el material de construcción de origen biológico más investigado por sus características de sismoresistencia, flexibilidad, estabilidad, ductilidad, forma regular, masa simétrica y peso, lo que no sucede con otros sistemas constructivos como la mampostería (Colorado, 2010). Sin embargo, pese a todas las investigaciones, ésta no ha tenido la suficiente acogida como material de construcción en los proyectos oficiales gubernamentales desarrollados en la actualidad y por lo tanto no se le ha dado un uso local adecuado; algunos Investigadores como Muñoz (2010) y Colorado (2010) consideran que existe un estigma que la relaciona con la miseria y la pobreza, posiblemente por el uso que ha tenido en tiempos recientes en los elementos y ambiente propios de clases sociales de bajos ingresos, a pesar de definir el contexto tecnológico del patrimonio arquitectónico del hoy denominado Paisaje Cultural Cafetero. Sin embargo, es importante reconocer que existen construcciones suntuosas propias de clases sociales de altos ingresos, que vienen utilizando la guadua como material de construcción, donde se reconocen sus atributos, representando una preferencia en escenarios donde otros materiales venían teniendo mayor aceptación.

Cabe mencionar, que no se conocen o no se tiene acceso a herramientas para la evaluación ambiental de alternativas de aprovechamiento de recursos locales, alternativos, no convencionales o excedentarios para la vivienda, que puedan ser aplicadas localmente, por lo que es necesario aplicar enfoques que representen el contexto local del objeto del estudio, involucrando variables específicas para la evaluación de alternativas de aprovechamiento de este tipo de recursos a esta escala.

Las interpretaciones emergentes de esta evaluación, acordes al potencial pluvial aprovechable, el potencial de reutilización de aguas grises, y el de utilización de recursos locales para la construcción, facilitarán establecer alternativas que pueden impactar favorablemente la vivienda urbana, desde una gestión alternativa en el abastecimiento de agua y el reconocimiento de materiales locales de menor impacto ambiental que se incorporan a la edificación, lo que contribuirá al desarrollo de estrategias de consolidación de ciudades más sostenibles.

En este orden de ideas, esta propuesta busca contribuir al conocimiento de los sistemas de aprovechamiento de agua no convencional como recurso excedentario, y el reconocimiento de recursos locales para la construcción, en busca del desarrollo de estrategias que visibilicen los beneficios de su utilización, abordando aspectos ambientales propios de la vivienda urbana.

2 OBJETIVOS.

A continuación, se presentan los objetivos general y específicos, así como la hipótesis planteada del proceso de investigación.

2.1 Objetivo General

Realizar la evaluación ambiental de una vivienda con énfasis en el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales y el uso de recursos locales para su construcción; como estrategias para la sostenibilidad urbana y territorial.

2.2 Objetivos Específicos

2.2.1 Objetivo 1:

Analizar el ciclo de vida de una vivienda convencional, y el de una vivienda con aprovechamiento de recursos locales y el uso de recursos hídricos no convencionales.

2.2.2 Objetivo 2:

Desarrollar una aproximación a los efectos y potencialidades en el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales y el uso de materiales locales (guadua) para la construcción de nueva vivienda a escala barrial.

2.3 Hipótesis

El aprovechamiento de recursos locales, excedentarios no convencionales en la vivienda, configura una estrategia para la mitigación de algunos impactos potenciales relacionados con el cambio climático, así como respuestas adaptativas que representan sistemas habitacionales más sostenibles, con menores impactos ambientales.

3 MARCO TEÓRICO

3.1.1 Desarrollo y Sostenibilidad

El rápido crecimiento de las ciudades, paralelo a la configuración de lo que actualmente se percibe como una crisis ambiental a escala global, ha promovido en las últimas décadas el surgimiento de teorías y conceptos como el desarrollo sostenible, los cuales en conjunto representan un replanteamiento del modelo de desarrollo socio-económico y la sostenibilidad ambiental. Estas dos dimensiones planteadas originalmente en el informe Brundtland² (1987), fueron ratificadas en la declaración de Río³ en 1992, involucrando por objetivo el mejoramiento de la calidad de vida humana, mientras se vive dentro de la capacidad de carga de los ecosistemas.

Según Leff (2010), la actual crisis ambiental ha sido causada por un desarrollo caracterizado por la irracionalidad ecológica; donde, como lo afirma Sanes (2012), los modelos de producción y consumo no han percibido la dimensión socio-económica como dependiente de una ecosistémica que la define, limita y sustenta.

Según Bermejo et al. (2010), y desconociendo esta dependencia, en busca de la permanencia del crecimiento económico ilimitado como paradigma del desarrollo; se plantean teorías tales como la teoría de la triple sustentabilidad, aplicada por el Banco Mundial, en la cual se incluye en la sostenibilidad la dimensión económica, social y ambiental; contraria a la propuesta del Informe Brundtland, en el cual la dimensión económica y social se abarcan en el desarrollo y la dimensión ambiental en la sostenibilidad para darle más peso a esta última. Otra teoría fue la desmaterialización, que plantea la posibilidad de seguir creciendo ilimitadamente, pero usando menos recursos a partir del desarrollo tecnológico. Sanes (2012) identifica como intención de estas teorías paralelas, el diluir el concepto de sostenibilidad, siendo el resultado de la reacción defensiva de los grupos de poder económicos mundiales para volver al sistema económico dominante.

Para Leff (citado por Sanes, 2012) el desarrollo sostenible implica necesariamente crecimiento económico, por lo tanto, el camino hacia la sostenibilidad está en dejar la economización de la naturaleza, la cual es vista como un medio de producción y fuente de riqueza, y ecologizar la economía, de tal manera que el paradigma económico se fundamente en los límites y leyes de la naturaleza, los potenciales ecológicos y la creatividad humana.

² UN. (1987). Our Common Future: Brundtland Report

³ Declaración realizada en la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, o Cumbre de la Tierra, efectuada en Río de Janeiro, Brasil en 1992

Naredo (2004), plantea que la sostenibilidad tiene una referencia espacio-temporal, clasificada como sostenibilidad local, parcial o global, y completa su definición desde una categoría que denominara como sostenibilidad fuerte (en oposición a la débil), basada en la economía física (termodinámica) y la economía de la naturaleza (ecología), siendo posible está a partir de la capacidad que los sistemas físicos tienen de abastecerse de recursos, deshacerse de residuos, y controlar las pérdidas de calidad que afecten su funcionamiento; aspectos estrechamente vinculados al comportamiento de los sistemas sociales que los organizan y mantienen. La sostenibilidad débil de Naredo da un tratamiento a este término estrictamente relacionado con el crecimiento económico.

Desde estas perspectivas se configura entonces la economía ecológica, cuyo objeto de estudio según Naredo (2014). es un crecimiento que respete los límites biofísicos, desde la cual se redefine el sistema ecológico, la sostenibilidad y las formas de valoración del capital natural, donde los componentes no son necesariamente ni homogéneos ni sustituibles. Desde este enfoque, conforme lo plantea Sanes (2012), se entiende la economía como un sistema social y físico abierto al flujo de materia y energía, y la salida de calor disipado y residuos.

En este orden de ideas, el concepto “sostenible” se define conforme lo postula Leff (2010), para este trabajo de grado, como condición ecológica y social para el “desarrollo”, entendido este como la satisfacción de las necesidades y aspiraciones humanas (Bermejo et al., 2010); tomando distancia del significado asumido de forma ambivalente, donde se plantea el proceso económico como condición para la sostenibilidad ecológica y social.

Conforme lo define Sanes (2012), el “desarrollo sostenible” como concepto se entiende en esta investigación como un proceso mediante el cual un sistema mejora la calidad de vida a través del tiempo, donde este desarrollo es más que la suma de sus partes, y esta mejora constante no es necesariamente crecimiento económico, y este a su vez no es necesariamente crecimiento material; implicando cambios en la forma en que las sociedades producen y consumen, y consecuentemente todos los procesos productivos de tal forma que la presión sobre los recursos naturales más allá de la preservación, como lo indica Gallopin (2003) involucren la capacidad social y ecológica frente al cambio, ampliando las opciones para confrontar un mundo natural y social en permanente transformación.

Esta definición involucra dos conceptos determinantes de la sostenibilidad, la producción y consumo.

3.1.2 Producción y Consumo en la vivienda social

Como concepto, la producción más limpia, o producción limpia se estable por la Oficina de Industria y Medio Ambiente del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA (1999), definido como “la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada y aplicada a procesos, productos, y servicios para mejorar la ecoeficiencia y reducir los riesgos para los humanos y el medio ambiente”. Este enfoque busca desarrollar mayor eficiencia en la utilización de los recursos o materias primas y recursos energéticos con el fin de prevenir o disminuir los impactos ambientales y guiar los procesos industriales hacia el desarrollo sostenible; la aplicación de este concepto, como se ha hecho referencia hasta el momento, ocurre en la industria, especialmente en el análisis de ciclo de vida –ACV. La producción más limpia es la estrategia propuesta en la agenda 21 en la cumbre de la tierra organizada por las Naciones Unidas en 1992 y ratificada en el 2005, para fortalecer el papel del comercio y la industria en el desarrollo sostenible (Sanes, 2012). La producción en el marco de esta investigación involucra el proceso de construcción, uso y deconstrucción que una vivienda puede involucrar a lo largo de su ciclo de vida.

Como concepto, según PNUMA, (2008) el “consumo sostenible,” *según la tercera sesión de la Comisión para el Desarrollo Sostenible en 1995, se refiere "Al uso de bienes y servicios que responden a necesidades básicas y proporcionan una mejor calidad de vida, al mismo tiempo que minimizan el uso de recursos naturales, materiales tóxicos y emisiones de desperdicios y contaminantes sobre el ciclo de vida, de tal manera que no se ponen en riesgo las necesidades de futuras generaciones".*

El consumo sostenible se puede entender como una serie de cambios en el comportamiento de los usuarios mediante la selección, compra, uso, mantenimiento, reparación y eliminación de cualquier producto o servicio, para mayor eficiencia en el consumo de energía y recursos, la minimización de residuos y hábitos de compra más racionales ambientalmente; estos cambios se deben adoptar como parte de una estrategia conjunta, ya que no se puede pensar que la sostenibilidad se alcanza sólo con la eficiencia en el uso de materias primas y la reducción de la contaminación y de los impactos, el camino a una sociedad más sostenible requiere un cambio real y radical en el comportamiento de los consumidores individuales y los patrones insostenibles de producción (Newman & Jennings, 2008; Bekin, Carrigan & Szmigin, 2007; Boada, Rocchi & Kuhndt, 2005; Vliet, Chappells & Shove, 2005; Myers & Kent, 2003; Myers, 2000; Citados por Sanes, 2012). Dicho cambio debe centrarse en patrones de consumo que involucren la preferencia por recursos locales, alternativos o no convencionales, que por su naturaleza excedentaria⁴ impliquen menores impactos ambientales en su

⁴⁴ Entendida esta como el estado de la oferta de un bien o servicio ambiental en relación a su capacidad de regeneración y asimilación de perturbaciones en términos cualitativos y cuantitativos.

aprovechamiento, mejorando la capacidad de los sistemas de urbanos en términos del ciclo de vida de los recursos transformados y consumidos, reutilizados y reincorporados.

3.1.3 Los recursos naturales locales, no convencionales y alternativos

El objeto de estudio de esta investigación, la vivienda urbana, centra su interés en el consumo sostenible y aprovechamiento de recursos naturales locales, como lo son la guadua para la construcción, y de suministro de agua no convencional que para el caso involucra alternativas como el agua de lluvia y las aguas grises.

El estado del arte en la investigación de este tipo de recursos es creciente, contando con estudios que establecen referentes para la evaluación y planificación del aprovechamiento a diferentes escalas urbanas, como la estimación realizada por Morales-Pinzón et al (2012a) sobre el Potencial de aprovechamiento de los recursos de agua de lluvia, a partir de aspectos urbanos y sociales en Colombia, donde se estudió el potencial ofrecido por este recurso hídrico no convencionales asociados con alta o baja densidad urbana de las nuevas viviendas, en distintas precipitaciones (800-2.300 mm), analizando diez ciudades en Colombia con más de 250.000 habitantes, consiguiendo estimar el potencial de sustitución de agua del grifo por el agua de lluvia de acuerdo con los grupos de población con diferente nivel socioeconómico; revelando condiciones favorables para la recogida de aguas pluviales en el contexto colombiano. En este estudio se concluye que para el escenario de consumo superior a 160 Litros per cápita por día, el agua de lluvia se convierte en un sustituto potencial de la red de agua en las zonas urbanas con precipitaciones por encima de 1.553 L/m²/año.

El autor plantea otros aportes al estado del arte en este tema, a partir de la modelización de coste económico y el análisis ambiental de las aguas pluviales, (Morales-Pinzón et al., 2014a), como resultado de la integración de diferentes herramientas metodológicas (evaluación del ciclo de vida y la simulación con dinámica de sistemas) y estudios para evaluar el coste económico y el posible impacto ambiental de suministros de agua alternativos (agua de lluvia y aguas grises) para el uso urbano; otros estudios como la Modelización financiera y ambiental de las Implicaciones de la dureza del agua para la utilización de agua de lluvia recolectada en lavadoras (Morales-Pinzón et al., 2014b), incorporan diversidad de variables a los análisis realizados, trascendiendo las condiciones de oferta del recurso (meteorológicas), físico-químicas (la dureza), para involucrar variables como el precio del agua de red, los materiales en los sistemas de aprovechamiento y la capacidad de almacenamiento. Todos ellos determinantes en la evaluación ambiental y financiera de la calidad del agua para uso urbano a diferentes escalas (desde edificio hasta barrio), encontrando con esta estrategia reducciones en el potencial de calentamiento global (100 años) que oscilan entre 35 y 101 kg de CO₂ eq. /vivienda/año.

Estos estudios para el caso de España, cuentan con análisis que involucran materiales para la construcción en el aprovechamiento de aguas lluvias, como es el caso de Farreny et al. (2011), quienes realizan una evaluación y selección de coberturas de techo para recogida de aguas pluviales y su impacto sobre la cantidad y calidad del recurso aprovechable; encontrando una alta viabilidad y conveniencia financiera y ambiental, en función de los impactos reducidos a los recursos hídricos convencionales, los impactos positivos en la economía de la vivienda al mediano y largo plazo.

Para el caso de la guadua como material local de construcción, Escamilla y Habert (2014), han realizado evaluaciones ambientales a través del estudio sobre Impactos ambientales de los materiales de construcción a base de bambú, que representan la diversidad de producción mundial; identificando su uso como una estrategia potencial para la reducción de la presión en los recursos naturales y en el medio ambiente, presentando ventajas ambientales y mecánicas sobre los materiales de construcción convencionales. Estos autores realizaron la evaluación del ciclo de vida de cinco materiales de construcción a base de Bambú, con el propósito de generar un enfoque general para la evaluación exitosa del impacto ambiental de materiales no convencionales con un alto grado de precisión y de una manera costo eficiente.

Una de las investigaciones desde las cuales los recursos descritos se articulan como estrategia para la sostenibilidad urbana, la plantean Morales-Pinzón et al. (2014c), quienes realizan una evaluación de los aspectos de sostenibilidad y el uso de materiales locales para la construcción de viviendas en Colombia; donde la apropiación de tecnologías y materiales en el proceso de construcción ha demostrado una reducción significativa de las cargas ambientales durante el ciclo de vida de la vivienda; encontrando que el uso de fuentes alternativas de agua no convencional (agua de lluvia, aguas grises) para uso doméstico puede representar una reducción de 0,28 kg CO₂ eq./m³ de agua del grifo reemplazado. Resultado que sumado al uso de materiales locales, como el bambú (guadua) en casas de tipología unifamiliar puede reducir los impactos ambientales potenciales hasta un 26% durante el ciclo de vida de la vivienda (31,2 kg CO₂ eq. /m²) y aumentar el empleo local.

Morales-Pinzón et al. (2014c) concluyen que *“el uso de materiales locales como bambú, ladrillo y teja de barro, y el uso de los recursos excedentarios como el agua de lluvia debe ponderarse con altos valores de importancia en la definición de estándares de sostenibilidad de la vivienda en los países en desarrollo. Su inclusión en la política pública de vivienda social puede ser una estrategia que perdura en el tiempo, más allá de la concepción limitada de materiales locales y el uso de los excedentes es una apuesta sólo para la población de menores ingresos”*, argumentando además que las viviendas construidas con materiales locales y el bajo coste económico tienen un menor impacto ambiental, incluso en las zonas urbanas donde predomina el uso de materiales convencionales y nuevos materiales (que no involucran materiales tradicionales o locales).

3.1.4 La vivienda social en Colombia, y la vivienda sostenible

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012). Y sus “Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana” el proceso de producción de vivienda en Colombia, presenta circunstancias similares a todos los países latinoamericanos: las viviendas urbanas se desarrollan de manera formal e informal; donde los proyectos de vivienda urbana presentan dos tipos de desarrollo acordes a las normas urbanísticas, la localización, el terreno y el sector poblacional a quien van dirigidos: los proyectos de viviendas individuales o casas y los proyectos en altura, edificios compuestos por apartamentos. Las casas pueden ser unifamiliares o bifamiliares, se desarrollan en un piso, en dos pisos o en tres pisos en lotes angostos. Los apartamentos son soluciones que se desarrollan en edificios de varias plantas y albergan varias familias, por eso se denominan multifamiliares.

La propuesta de criterios ambientales para la vivienda en Colombia que plantea el MADS (2012) se desarrolla alrededor de tres objetivos básicos de gestión ambiental que se constituyen a su vez en principios fundamentales de la arquitectura sostenible:

- La racionalización del uso de los recursos naturales.
- La sustitución con sistemas o recursos alternativos.
- El manejo del impacto ambiental.

El primer objetivo aborda la problemática ambiental del uso racional de los recursos naturales y su reducción a nivel de consumo mundial, particularmente en el uso de agua, energía y materiales de construcción. Este objetivo considera el ahorro de los recursos naturales en las diferentes etapas de la producción de vivienda, con estrategias de diseño y adecuadas técnicas de construcción.

El segundo objetivo explora alternativas constructivas, técnicas y tecnológicas, que permitan sustituir parcial o totalmente los sistemas tradicionales de alto consumo o costo. En este sentido se consideran los sistemas alternativos de energía, la reutilización de aguas grises y el aprovechamiento de aguas pluviales, las tecnologías y materiales alternativos, el reciclaje de materiales y componentes, el reciclaje de estructuras urbanas y la renovación de zonas urbanas en deterioro.

El tercer objetivo plantea el manejo de los impactos ambientales, considerando acciones de prevención, control, mitigación y compensación de los mismos, durante las diferentes etapas del ciclo de producción de la vivienda. En este sentido se plantea el uso de recursos con mínimos impactos ambientales, el ahorro del agua y el uso eficiente del suelo y la energía, evitando con ello el agotamiento de estos recursos.

Estos criterios hacen énfasis en la Adaptación de usos alternativos del agua a partir de fuentes abastecedoras alternativas como la captación y almacenamiento de aguas lluvias, y la recirculación de aguas grises en el sistema de la vivienda, donde las aguas

provenientes de estas fuentes deben ser utilizadas para actividades que no requieran potabilización.

Para Colombia se identifican como aguas grises las provenientes de duchas, lavamanos y lavaderos, las cuales pueden ser útiles en la limpieza locativa, riegos y desagües sanitarios.

El MADS (2012) define criterios ambientales de los materiales en la vivienda urbana, considerando para la selección de los materiales aspectos como: la estética, el rendimiento y la disponibilidad a nivel local, sumados a las condiciones de sostenibilidad ambiental que presentan en cuanto a los impactos ambientales locales y globales generados en su producción y la energía incorporada. Se sugiere entonces sustituir materiales y procesos de alto impacto, reemplazando progresivamente los materiales que en los procesos constructivos presentan mayores impactos ambientales, consumos energéticos, emisiones contaminantes o componentes nocivos, por productos con menor impacto ambiental.

Estos criterios relacionados con el uso de recursos hídricos no convencionales y materiales locales en la construcción configuran el marco conceptual que para este estudio representa una vivienda social más sostenible.

De otro lado, y como parte de los criterios de sostenibilidad relacionados con los impactos ambientales de la vivienda urbana, la emisión de gases efecto invernadero por el uso de materiales de construcción y consumo de agua son factores relevantes para la mitigación del cambio climático en Colombia.

Según la “Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional - iNDC del MADS (2015) y el “ABC de los Compromisos de Colombia para la COP21 de García et al (2015), Colombia es responsable del 0.46% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global, según datos de 2010. Sin embargo, esta participación tiene tendencia a crecer. Se calcula que, si no se toman medidas, las emisiones podrían aumentar cerca de 50% en 2030. Actualmente, las emisiones acumuladas entre 1990 y 2012 sitúan a Colombia entre los 40 países con mayor responsabilidad histórica en la generación de emisiones de gases de efecto invernadero.

Colombia se comprometió a reducir el 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero proyectadas para el año 2030, y en este escenario, solo incluye medidas que estén por debajo de 30 dólares por tonelada de CO₂ reducida. Según el análisis del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015), son medidas que transforman los sectores productivos mediante las cuales el país le puede apuntar a una economía menos intensiva en carbono. Donde, de 84 medidas identificadas, solo 65 fueron elegidas con base en esos criterios, priorizando seis (6) sectores de la economía nacional, y en lo concreto, apuntando a la construcción sostenible y la utilización de materiales con menor huella de carbono, así como a la eficiencia energética e hídrica en ámbito residencial y el ordenamiento territorial para impulsar ciudades sostenibles.

4 ESTADO DEL ARTE

4.1 EXPERIENCIAS EN EL USO DEL AGUA DE LLUVIA EN COLOMBIA

Morales-Pinzón et al. (2012b), a partir del estudio del aprovechamiento de agua de lluvia en áreas urbanas de Colombia estima el grado potencial de sustitución de la demanda de agua de red en diferentes escalas urbana relacionado a aspectos generales de urbanismo y según grupos de población con diferente nivel socioeconómico. Los autores presentan las condiciones generales para determinar la viabilidad de proyectos nuevos de vivienda urbana con integración del aprovechamiento de agua de lluvia bajo diferentes escenarios de consumo (denominados real y responsable) y oferta de agua. El estudio revela que existen condiciones favorables para el aprovechamiento del agua de lluvia en el contexto colombiano y permite relacionar aspectos de oferta y demanda asociados a características climáticas locales, así como a la viabilidad ambiental debida a la oferta del recurso, proponiendo además integrar el aprovechamiento de este recurso en proyectos de vivienda urbana mostrando que la oferta potencial de agua de lluvia en las ciudades de Colombia encontrando que los proyectos de vivienda pueden satisfacer la demanda total de agua (56%) para los diferentes usos a consumo humano.

4.2 USOS DOMÉSTICOS DEL AGUA NO CONVENCIONAL

Para entender el potencial uso del agua de lluvia, es necesario conocer los usos domésticos del agua. Como recurso vital y esencial para la supervivencia y desarrollo humano, el agua presenta cinco demandas típicas en cualquier asentamiento humano, las cuales incluyen el agua para beber y agua para uso doméstico (cocina, limpieza, higiene y saneamiento) (World Water Assessment Programme, 2012). En general, el uso urbano doméstico del agua se puede clasificar como usos internos y usos externos. El agua potable para consumo humano se considera un uso interno, la cual debe ser apta para consumo humano (agua para beber y cocina) conforme a los parámetros establecidos en la normativa vigente. Otros usos internos del agua son los que se destinan principalmente para los inodoros, lavado de ropa, aseo personal, aseo de la vivienda, mientras que el agua externa se utiliza en actividades como lavado de autos, el uso de la piscina y el riego entre otros.

Algunos de los usos internos y externos pueden ser satisfechos con un agua de menor calidad que la potable (generalmente suministrada por la red pública). Utilizando un enfoque de calidad sobre la demanda de agua se puede diferenciar entre los usos domésticos de agua y destinar ciertos usos, por ejemplo, lavado de ropa, inodoros,

riego y piscina como potenciales demandas que pueden ser parcial o totalmente satisfechas con agua no convencional. Según Roebuck et al. (2011), las aplicaciones no potables más ampliamente aceptados para el agua de lluvia recolectada son agua para inodoro, riego de jardines y lavadora.

Ratnayaka et al. (2009) y Domènech, et al. (2011) muestran que aproximadamente el 45% de la demanda doméstica de agua puede ser suministrada por los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia. Mukhopadhyay et al. (2001), Lazarova et al. (2003) y Campisano y Modica (2010) han demostrado que hasta un 30% de agua en las casas se suele utilizar para las cisternas de los inodoros. Esta demanda debería ser satisfecha por los sistemas de reutilización de aguas grises. Además, este uso sólo requiere de tratamiento básico, es decir, filtración y cloración (Campisano y Modica, 2012). Villarreal y Dixon (2005) revelaron que el 30% del suministro de agua de red puede llegar a ser sustituido (partiendo de las actividades de aseo y uso de lavadora solamente).

Aunque los consumos internos varían según las condiciones socioeconómicas y regionales, un alto porcentaje corresponde a usos que no requieren calidad de agua potable. Así se encuentra que algunos estudios (Ratnayaka et al. (2009), Domènech et al., (2011), Morales-Pinzón et al., 2012 y Ballén, Galarza, & Ortiz, 2006), han estimado consumos entre el 33% y 53% corresponden a inodoro y lavadora (o lavado de ropa), los cuales pueden ser efectivamente sustituidos por agua no convencional. El agua de lluvia aplicaría para los dos tipos de uso, mientras que el agua gris podría ser utilizada en inodoros.

4.3 MÉTODOS GENERALES PARA ESTIMAR EL POTENCIAL HÍDRICO NO CONVENCIONAL.

Para el cálculo del ahorro potencial de agua potable a partir del aprovechamiento de pluviales a nivel doméstico Abdulla y Al-Shareef (2006) y Ghisi (2006) realizan emplean el producto entre la precipitación promedio mensual o anual, el área de captación y el coeficiente de escorrentía, como un valor de la oferta disponible. Fewkes (2000) ajusta este cálculo al incorporar una variable adicional que es la pérdida en el almacenamiento por depresión. Abdulla y Al-Shareef (2006 y 2009) recomiendan tomar un valor del 20% anual que representa las pérdidas globales debidas a la evaporación, pérdidas en la recolección, conducción y almacenamiento, entre otras. Ghisi (2006) plantea la metodología para determinar el potencial de ahorro de agua potable, el cual es un valor porcentual que se expresa como la relación entre el volumen total captado de agua lluvia y la demanda total.

La misma expresión es luego utilizada por Ghisi, Lapolli y Martini (2007) en su evaluación para un sector residencial del sur de Brasil. La ecuación para el cálculo del potencial de ahorro de agua potable, aparece de nuevo expresada de la misma manera

por Abdulla y Al- Shareef (2006 y 2009) y por Cheng y Liao (2006). Ghisi (2006) plantea como metodología para determinar el potencial de ahorro de agua potable, el cual es un valor porcentual que se expresa como la relación entre el volumen total captado de agua lluvia y la demanda total.

Villarreal y Dixon 2004, plantean un modelo a gran escala de aprovechamiento, con captación de aguas lluvias en los techos de las viviendas y edificaciones, para abastecer a toda la ciudad de Ringdansen (Suecia), especialmente para los usos de descarga de sanitarios, lavanderías, lavado de carros y riego de jardines.

Morales-Pinzón, Rieradevall, Gasol, & Gabarrell, 2015, desarrollaron un modelo que permite simular el potencial de aprovechamiento de agua de lluvia y de aguas grises en diferentes sistemas urbanos entendidos como escalas de análisis (casa, edificio, barrio, gran superficie). Usando simulación con dinámica de sistemas presenta un algoritmo general que puede ser aplicado para estimar el comportamiento del uso del agua en diferentes escalas de sistemas urbanos y permite hacer estimaciones de potenciales impactos ambientales asociados al ciclo de vida del sistema de captación y uso del agua de lluvia y también de la reutilización de aguas grises de origen doméstico

4.4 MODELACIÓN DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA NO CONVENCIONAL

Existen varias aplicaciones informáticas que facilitan analizar las alternativas de abastecimiento de agua para usos urbanos. Algunos estudios han compilado estos modelos que sirven para simular la cantidad de aguas pluviales y la calidad en un entorno urbano (Zoppou, 2001) mientras que otros modelos estudian el impacto sistemas de drenaje de aguas pluviales urbanas (Elliott & Trowsdale, 2007). Con relación al aprovechamiento de agua no convencional Ward, Memon and Butler (2010) muestra 10 modelos que pueden ser utilizados más uno descrito inicialmente por Morales-Pinzón et al. (2012b). De los once modelos cinco son específicos para agua de lluvia y uno de ellos realiza estimaciones con la reutilización de aguas grises, siendo el único que además estimas los impactos potenciales ambientales desde una perspectiva del ciclo de vida. (ver Tabla 1)

Modelo	Referencia	Funciones
Rewaput	Vaes & Berlamont (2001)	Exclusivo para agua de lluvia. Es un modelo de estimación de capacidad de almacenamiento, con relaciones intensidad - duración - frecuencia de las precipitaciones con uso de la distribución triangular.
RCSM	Fewkes (2004)	Exclusivo para agua de lluvia. Analiza el comportamiento del sistema con simulación continua, realiza el análisis detallado de la variación según el intervalo de tiempo y calcula rendimientos antes / después de satisfacer la demanda.
RSR	Kim & Han (2006)	Exclusivo para agua de lluvia. Dimensiona el tanque de captación de aguas de lluvia para la retención de aguas pluviales y reducir las inundaciones.
RainCycle	Roebuck & Ashley (2006)	Exclusivo para agua de lluvia. Está soportado en el balance de masas y realizado en la hoja de cálculo Excel, usando simulación y utilizando un algoritmo de rendimiento después de satisfacer el consumo y con un enfoque de costos del sobre toda la vida del sistema.
Plugrisost	(Morales-Pinzón et al., 2015)	Simula los volúmenes de depósitos de sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia y aguas grises. Estima impactos potenciales ambientales y algunos indicadores financieros.

Tabla 1. Modelos para evaluar sistemas de aprovechamiento de agua no convencional

4.5 Eficiencia energética en la producción y distribución de agua de red.

Existen pocos estudios e informes técnicos que permitan establecer con precisión el consumo energético requerido para la producción y distribución del agua en red.

JESSICA ALMAZÁN LOPE (2014) planeta como consumo energético para España un valor de 0,44 kW/m³ a caudal medio.

Según ESMAP (2012), la intensidad eléctrica de suministro de agua en el Estado de Nueva York, varía desde 0,158 hasta 0,285kWh/m³ de agua producida, siendo la media nacional de EE. UU de 0.370kWh/m³ de agua producida. Según ESMAP, los valores se ven afectados de manera significativa por las condiciones de operación del sistema (por ejemplo, el flujo diario de agua, la longitud de la red, la combinación de fuentes de agua, la elevación de la distribución, el uso de la gravedad para la distribución y/o recolección, etc.) y las tecnologías de procesamiento.

Acorde a esto, y según Kenway y otros, (2011), Citados por Ferro (2015), la energía requerida para potabilizar y distribuir el agua de red varía significativamente entre ciudades, reflejando la diversidad de las condiciones físicas locales (tales como calidad del agua, distancia de bombeo, topografía, etc.). Por ejemplo, en 2006-07 para Australia el rango fue entre 0,09 a 1,92 kWh/m³. En el Brasil, entre las empresas de jurisdicción estadual, el gasto de energía promedio para producir un metro cúbico de agua extraída, potabilizada y distribuida en 2011 era de 0,71 kWh. Entre las empresas municipales, la energía media utilizada para producir un metro cúbico de agua fue de 0,83 kWh.

Venkatesh, G. Brattebo, H. (2011) plantea que el consumo energético por el tratamiento de agua y su distribución para consumo humano en Oslo, presento entre el año 2000 y el 2006, valores entre 0.38 y 0.44 kWh por metro cúbico.

Una síntesis de los datos disponibles sobre el consumo energético por m³ de agua producida, distribuida y consumida se presenta a continuación como referente para el

establecimiento de una línea base que permita el cálculo de los impactos ambientales del agua en red.

PAÍS O CIUDAD	ENERGÍA CONSUMIDA POR M3 DE AGUA FACTURADA (KWH/M3)
CHINA*	Entre 0.5 y 0.7 KWh/m3
BRASIL*	Entre 0.7 y 1.9 KWh/m3
RUSIA*	Entre 0.3 y 1.4 KWh/m3)
INDIA*	Entre 0.3 y 1.9 KWh/m3
EGIPTO*	Entre 0.2 y 0.7 KWh/m3
OSLO (NORUEGA)	Entre 0.38 y 0.44 KWh/m3
NUEVA YORK (EE. UU)	Entre 0.16 y 0.28 KWh/m3
AUSTRALIA	Entre 0.09 y 1.92 KWh/m3
ESPAÑA	0.44 KWh/m3
EE. UU	0.37 KWh/m3

Fuente: Elaboración propia. * Datos tomados de ESMAP (2012).

Respecto de las bombas elevadoras, Kenway y otros (2011) destacan que elevar el agua 6 pisos de un inmueble vertical implica un gasto de 0,14 kWh/m³, por lo que en ciudades con muchos edificios de altura se incrementa el consumo energético. Sin embargo, en ciudades muy extendidas geográficamente y con un sistema de abastecimiento centralizado, la necesidad del bombeo horizontal por las largas distancias (a los suburbios) también puede ser significativa.

5 METODOLOGÍA

Los enfoques metodológicos desde los cuales se desarrolló la investigación, contemplan la utilización de metodologías funcionalistas para el desarrollo del primer objetivo específico, y de metodologías interpretativas para el caso del segundo⁵.

Desde el enfoque funcionalista, se cuenta con una metodología y soporte teórico, materializado a través del Análisis del Ciclo de vida, como método para evaluación ambiental de los impactos potenciales evitados por el aprovechamiento de recursos locales en la fase de construcción y el uso de recursos hídricos no convencionales en la fase de uso de la vivienda.

El enfoque interpretativo, se plantea como el más adecuado para la aproximación a los impactos potenciales del aprovechamiento de recursos locales para la construcción y recursos hídricos no convencionales en la vivienda a escala barrial, dado que parte de los resultados obtenidos en la vivienda como unidad de análisis, e infiere un potencial urbano a partir de datos relacionados con el número y tipología de la vivienda social de la ciudad de Pereira.

En el contexto de esta investigación, el ACV se entiende como una metodología que permite evaluar los impactos ambientales de un producto (en este caso entendido como la vivienda) en cada una de las etapas de su ciclo de vida, con el fin de determinar su sostenibilidad; para lo cual incluye indicadores de evaluación de factores ecológicos, políticos, económicos, socio-culturales, y tecnológicos, constituyendo un enfoque sistémico que responde a economía ecológica como enfoque metodológico, ya que permite cerrar y analizar el ciclo completo de la utilización de materiales y recursos.

Como estudio de caso, se aborda entonces la vivienda social en la ciudad de Pereira (Colombia), que desde su concepción como proyecto haya incorporado en sus materiales de construcción recursos locales. Se seleccionaron aquellas tipologías que cuentan con registros e información secundaria para la estimación de las variables a estudiar, de tal manera que fuera posible cuantificar los recursos locales utilizados en la vivienda, principalmente de bambú (*Guadua angustifolia*).

Para la evaluación del uso de recursos hídricos no convencionales, como el agua de lluvia y la reutilización de aguas grises en usos no potables, se tomaron como estudio de caso sistemas que cuentan con materiales rudimentarios y de baja complejidad para su aprovechamiento.

⁵Enfoques metodológicos definidos por Jackson, Citado por Ossa, 2004

5.1 Metodología - Objetivo Específico 1

Analizar el ciclo de vida de una vivienda convencional, y el de una vivienda con aprovechamiento de recursos locales y el uso de recursos hídricos no convencionales.

La metodología utilizada para el desarrollo de la evaluación ambiental, fue el Análisis del Ciclo de Vida (en adelante ACV), el cual se encarga de abordar y analizar los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o de una actividad productiva, ya que la producción y consumo sostenibles, solo se lograrán si se piensa en el impacto ambiental en cada etapa de toma de decisiones en el campo industrial y de consumo.

En este análisis se incluyen los productos, los efectos ambientales derivados del consumo de materias primas y de energías necesarias para su elaboración, las emisiones y los residuos generados en el proceso de producción, así como los efectos ambientales procedentes del fin de vida del producto cuando se consume o no se puede utilizar. (Sanes, 2012)

Las Fases que comprendieron el desarrollo metodológico del ACV en este estudio, conforme lo planteado por la Norma ISO 14040⁶ son:

- La definición del objetivo y alcance,
- Análisis de inventario,
- Evaluación de impacto y
- La Interpretación.

Esta última fase de interpretación representa los resultados del desarrollo metodológico del ACV, como podrá apreciarse en el capítulo de resultados obtenidos.

5.1.1 La definición del objetivo y alcance,

Debido a la necesidad de poder establecer comparaciones con otros estudios, como unidad funcional se ha definido la construcción y uso de 1m² de vivienda con un ciclo de vida de 50 años y habitada por 4 personas.

5.1.2 Los límites del sistema.

El impacto ambiental de la vivienda se evaluó sobre el ciclo de vida simplificado de las fases de construcción, uso y fin de su vida útil.

⁶ ISO 14040 Second edition. 2006-07-01. INTERNATIONAL STANDARD. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework Management environmental — Analyze du cycle de vie — Principe's et cadre

La **fase de construcción** constituye la primera etapa en el ciclo de vida de una vivienda, e incluye la producción de materiales de construcción, el transporte de materiales al sitio de construcción, y la energía consumida durante esta fase (los residuos generados en la obra de cada material de construcción no se incluyeron).

La **fase de uso** se incluyen las actividades de operación y mantenimiento relacionados con el consumo de energía y el consumo de agua (otras actividades de mantenimiento de la casa no se consideraron).

La **fase final** del ciclo de vida de la vivienda, considera un escenario optimista de la tasa de recogida de metales, de piedra y plástico de 60%, 80% y 80%, respectivamente, según lo sugerido por Ortiz-Rodríguez et al. (2010). Además, el potencial de uso de agua de lluvia y aguas grises, así como de materiales de construcción se estimó utilizando el software Plugrisost (Morales-Pinzón et al., 2012a). El análisis de los impactos ambientales potenciales, fue modelado a partir de datos reales de la vivienda seleccionada, y se complementó con un modelo de simulación para la fase de uso del agua no convencional, siguiendo los parámetros generales que se dan en el inventario presentado en la Tabla 2.

Materiales	Unidades	Categoría	Vivienda construida con materiales locales	Vivienda construida con materiales convencionales (1)
Aluminio	kg	Cubierta	0,0	17,7
Azulejos de cerámica	kg	Cubierta	900	900
Vidrio	kg	Cubierta	75	75
Teja	kg	Cubierta / Techo	1920	1920
Ladrillo	kg	Albañilería	750	7928,6
Mortero	kg	Albañilería	2470	3211
Guadua (2)	m ³	Material estructural	10,2	0
Acero	kg	Metales	1400,3	1767,9
Pintura sintética	kg	Pinturas	6,1	7,9
PVC	kg	tuberías, cableado	141,2	141,2
Concreto	m ³	Concreto	14,1	26
Uso de agua	m ³	Etapa de construcción	160,4	285,1
Uso de energía	kWh	Etapa de construcción	2,7	9
Demanda doméstica de agua	L/día	Uso		503
Demanda doméstica de agua lluvia (uso para lavados)	L/día	Uso		136
Demanda doméstica de agua gris (Uso para inodoros)	L/día	Uso		101
Superficie de captación de agua de lluvia	m ²	Uso		45
Consumo de energía (3)	kWh/año	Uso		1680
Consumo de energía bombeo (5)	kWh/m ³	Uso		0.7
Capacidad de Almacenamiento aguas grises. (Tanque de agua gris) (4)	m ³	Uso		0.5
Capacidad de almacenamiento aguas lluvias. (Tanque de agua lluvia) (4)	m ³	Uso		1

(1) Estimado por Ortiz-Rodríguez et al. (2010) and Legis (2014)

(2) Adaptado de "local bamboo (Guadua angustifolia) using the life cycle inventory given" de Escamilla y Habert (2014).

(3) Los datos de electricidad en Colombia se basaron en la información procedente del Sistema Interconectado Nacional de Colombia y su Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2014)

(4) Valores sugeridos para una vivienda social por Morales-Pinzón et al. (2013).

(5) Dato optimista planteado para Pereira a partir del Mix de Brasil.

Tabla 2 - Materiales y procesos utilizados según tipología de vivienda de 45 m².

5.1.3 El análisis de inventario

Los inventarios analizados se realizaron en un tipo de vivienda social, urbana en la ciudad de Pereira. Esta vivienda representa una casa unifamiliar de 45 m² y un solo nivel. La vivienda analizada fue construida a través de un programa realizado con recursos del Gobierno de la República Federal de Alemania, el Ministerio de la Cooperación Económica y del Desarrollo (BMZ) y la Cooperación Técnica al Desarrollo - GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit), que apoyó la reconstrucción posterior al terremoto del año 1999, dirigido a las familias más vulnerables del eje cafetero. Este programa desarrollo 25 casas nuevas y la rehabilitación de 2 casas en barrio Bella Vista del municipio de Pereira (GTZ, 2002) (ver Imagen 1).



Imagen 1. Viviendas sociales objeto de estudio, construidas con materiales locales (Guadua) en el eje cafetero.

Estas viviendas fueron diseñadas y construidas incorporando factores tipológicos, tecnológicos, culturales, económicos, ecológicos, educativos y sociales; considerando los recursos naturales existentes en la zona (Guadua, teja de barro, material de río), el aprovechamiento de la mano de obra existente (autoconstrucción), la recuperación de

tecnologías apropiadas como el uso del bahareque; contemplando criterios de sismo resistencia como la guadua como elemento estructural principal y los sistemas de ensamble y de distribución de cargas.

Los datos de agua de lluvia y aguas grises fueron procesados mediante el software Plugrisost (Morales-Pinzón et al., 2012a). La vida útil del sistema se definió en 50 años de acuerdo con la propuesta original de Roebuck et al. (2011).

La precipitación se obtuvo de los registros históricos de los años 2008-2014 reportados por la Red Hidroclimatológica del Departamento de Risaralda (Universidad Tecnológica de Pereira, 2014)

Las cantidades de materiales y energía utilizados por el sistema se calculó utilizando el software de Plugrisost (Morales-Pinzón et al., 2012a). Como entradas, fueron seleccionados tanque de hormigón, tubos de polipropileno y una bomba de acero inoxidable.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV), para los materiales de construcción de la vivienda convencional y la vivienda más sostenible se realizaron con la ayuda del software SimaPro, programa desarrollado por la empresa holandesa "PRé Consultants", que permite realizar el ACV mediante el uso de bases de datos de inventario propias (creadas por el usuario) y bibliográficas (Ecoinvent, BUWAL, IDEMAT, ETH, IVAM).

5.1.4 Evaluación de impacto

Como un método de análisis de los impactos potenciales se utilizó la línea de base v2.04 LMC, para la evaluación de los impactos potenciales del aprovechamiento de agua lluvia y agua gris en la vivienda, así como los materiales en la construcción de la vivienda; considerando dos sistemas, el primero la vivienda unifamiliar de un solo piso, construida con materiales convencionales, y el segundo la vivienda construida con materiales locales y aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales.

Las categorías de impacto evaluadas fueron el **Potencial de Calentamiento Global** (GWP, en kg CO₂ eq.), la **Acidificación Potencial** (AP) (kg SO₂-eq), **toxicidad humana** HT (kg 1,4-DCB-eq), el **agotamiento de los recursos abióticos** (kg de antimonio-eq), el **agotamiento del ozono estratosférico** SOD (kg de CFC-11-eq), y la **eutrofización**, consideradas en el análisis de la vivienda construida con materiales locales (Guadua), donde adicionalmente se consideró la utilización de agua lluvia y gris como modelo de sistema más sostenible.

A continuación, se describen cada una de las categorías de impacto potencial utilizadas en este estudio, planteadas según Guinée et al. (2001), y definidos de una manera simplificada por la Universidad de Deusto (2012).

Potencial de Calentamiento Global.

“La tierra absorbe la radiación del sol. Esta energía es redistribuida por la atmosfera y los océanos, y retornada en forma de radiación de infrarrojo térmico. Parte de esta radiación es absorbida por los gases existentes en la atmosfera provocando el calentamiento del planeta, a este fenómeno se conoce como efecto invernadero (Global Warming). Estos gases son principalmente el vapor de agua y CO₂ y otros gases como CH₄, N₂O y CFCs. La acción humana ha provocado un incremento de estos gases, lo que lleva o puede llevar a un sobrecalentamiento del planeta y por lo tanto a una alteración de sus condiciones. Esta categoría de impacto afectara a las áreas de salud humana, ambiental natural y ambiente modificado por el hombre. El indicador que sirve para evaluar este impacto se expresará como POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL O GWP (Global Warming Potential).”

Acidificación potencial.

“Consiste en la deposición de ácidos resultantes de la liberación de óxidos de nitrógeno y sulfuro en la atmosfera, en el suelo y en el agua, dónde puede variar la acidez del medio, cosa que afectara a la flora y fauna que habita en él, produciendo deforestación y también una posible afectación a los materiales de la construcción de las edificaciones existentes. Las áreas de protección frente a este impacto serán salud humana, recursos naturales, entorno natural y modificado por el ser humano.”

Toxicidad humana.

“En esta categoría se contemplan los efectos sobre el ser humano y los ecosistemas acuáticos y terrestres, producto de las sustancias toxicas existentes en el ambiente. Afecta a las áreas de protección salud humana, entorno natural y recursos naturales. Estas categorías son aquellas para las cuales el factor destino y especialmente el transporte a través de diferentes medios, tiene más importancia. Un contaminante no permanece en el medio (entiéndase aire, suelo, agua superficial, agua subterránea, entre otros) en que es emitido, sino que puede desplazarse y alcanzar otros medios que serán a su vez contaminados. Una determinada sustancia puede incluso ser más dañina en un medio diferente al de su emisión.”

El agotamiento de recursos abióticos.

“Este indicador categoría de impacto está relacionado con la extracción de minerales y combustibles fósiles, debido a las entradas en el sistema. Se puede definir como la disminución de la disponibilidad de recursos naturales. Se incluye en esta categoría de protección los recursos abióticos y energía.”

Agotamiento del ozono estratosférico.

“La capa de ozono está presente en la estratosfera y actúa como filtro absorbiendo la radiación ultravioleta. La disminución de la capa de ozono provoca un incremento de la

cantidad de radiación UV-B que llega a la superficie de la tierra. Dichas radiaciones son causa del aumento en algunas enfermedades en los humanos (cáncer de piel, supresión sistema inmunitario, cataratas, entre otras), afectan a la producción agrícola, degradación de materiales plásticos e interfieren en los ecosistemas, afectando por tanto a las cuatro grandes áreas de protección: salud humana, entorno natural, entorno modificado por el ser humano y recursos naturales. La mayoría de los cloruros y bromuros, procedentes de compuestos fluorocarbonados, CFCs y otras fuentes, reaccionan en presencia de las nubes estratosféricas polares (PSCs) emitiendo cloruros y bromuros activos que bajo la acción catalizadora de los UV provocan la descomposición del ozono.”

Eutrofización.

“En esta categoría se incluyen los impactos atribuidos a un alto nivel de los macronutrientes, nitrógeno y fósforo. Su incremento puede representar un aumento de la producción de biomasa en los ecosistemas acuáticos. Un aumento de las algas en los ecosistemas acuáticos producirá una disminución del contenido de oxígeno debido a que la descomposición de dicha biomasa consumirá oxígeno medido como DBO. Este consumo de oxígeno puede conducir a alcanzar unas condiciones anaerobias que provocarán la descomposición causada por bacterias anaerobias que liberarán CH₄, H₂S y NH₃. En último término desaparece cualquier tipo de vida aerobia. El proceso de eutrofización aumenta en temporadas cálidas.”

Formación oxidantes foto-químicos.

“Bajo la influencia de la radiación solar, los óxidos de nitrógeno, NO_x, reaccionan con los compuestos orgánicos volátiles, VOCs, para producir ozono troposférico, este fenómeno tiene lugar principalmente durante los meses de verano. La presencia de monóxido de carbono puede igualmente contribuir a la formación de ozono. Estos oxidantes foto-químicos pueden resultar perjudiciales para la salud humana, los ecosistemas y la agricultura. Afectando por tanto a las cuatro áreas de protección.”

Toxicidad humana, terrestre y acuática

“En esta categoría se contemplan los efectos sobre el ser humano y los ecosistemas acuáticos y terrestres de las sustancias tóxicas existentes en el ambiente. Afecta a las áreas de protección salud humano, entorno natural y recursos naturales. Estas categorías son aquellas para las cuales el factor destino y especialmente el transporte tiene más importancia. Un contaminante no permanece en el medio (entiéndase aire, suelo, agua superficial, agua subterránea, mar...) en que es emitido, sino que puede desplazarse y alcanzar otros medios que serán a su vez contaminados. Una determinada sustancia puede incluso ser más dañina en un medio diferente al de su emisión.”

5.1.5 Metodología - Objetivo Específico 2.

Desarrollar una aproximación a los efectos y potencialidades en el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales y el uso de materiales locales (guadua) para la construcción de nueva vivienda a escala barrial.

Una vez realizado el análisis para la unidad de estudio (la vivienda), se generó una estimación sobre el impacto ambiental potencial urbano a escala barrial de aprovechamiento de los recursos estudiados, asumiendo que cada vivienda incorpora un sistema individual para el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales.

Esta aproximación se obtuvo a partir de los resultados de los potenciales impactos ambientales que para la vivienda fueron estimados por m³ de agua consumida según la fuente y m² construido según los materiales utilizados. Dichos datos se relacionaron con un análisis de conglomerados realizado sobre el número de unidades habitacionales que conforman los barrios de vivienda social en Pereira, registradas por Orozco y Guzmán (2014). (ver Tabla 3)

Comuna	Proyecto habitacional	N° viviendas	Comuna	Proyecto habitacional	N° viviendas	Comuna	Proyecto habitacional	N° viviendas
Villa Santana	Bellavista	112	Boston	Providencia	815	Olímpica	Alfa	37
	Remanso	1.186		Boston	660		Gamma I	56
	Las Brisas	1.138		El Vergel	139		Gamma II	98
Ciudadela Tokio	924	Ciudad Palermo		270	Gamma III		99	
Primero de Mayo	785	San Luis Gonzaga		185	Gamma IV		99	
Rio Otún	Bavaria	80	Jardín	El Jardín I	1.065		Gamma V	56
	Campaña del Otún	88	El Jardín II	394	Olimpico I		100	
	San Camilo	328	Cuba	Cuba	1.114		Olimpico II	98
	La Sirena	99	Consota	La Divisa	82		San Marcos	519
	Nuevo Peñol	334		Naranjito	230		Guayacanes	356
	José Martí	216		El Futuro	96	Urbanización Santa Clara	120	
	El Triunfo	374		Padre José Valencia	462	Salamanca	725	
	San Antonio	104		Villa Consota o Panorama II	206	Ciudadela Comfamiliar I	335	
	Cañarte	1.314		Dorado I	723	Ciudadela Comfamiliar II	200	
	Centro	Primero de Febrero		200	Dorado II	250	Los Girasoles	53
Buenos Aires		86		Sinaí II	179	Portal de San Joaquín I	67	
Santander		90		Villa Andrea	150	Portal de San Joaquín II	91	
Oriente	Ormaza	140		Panorama I	151	Carlos Alberto Benavides	190	
	Santander	341	Porvenir o las Mercedes	79	Consota	84		
	César Nader Nader	136	Las Pirámides	75	Departamento	88		
	Chicó Restrepo (Libaré)	52	Normandía	186	El Bosque	137		
	Paz del Río	80	Vendedores Ambulantes	200	Gaviria Trujillo	29		
El Oso	Alejandría	282	Aguas Claras	40	Héroes I	191		
	El portal de las Mercedes	134	Ciudad Baquía	875	Héroes II	223		
San Nicolás	La Dulcera	104	Rincón del Café	26	Independientes	229		
El Poblado	Samaria I	1.637	Horizontes	70	José Domingo Escobar	42		
	Samaria II	609	Ciudadela Comfamiliar Boquia	464	La Campiña	212		
	Cachipay	124	Luis Alberto Duque	205	La Francia	176		
Ferrocaril	Gilberto Peláez Ángel	189	Nuevo Horizonte	980	La Albania	235		
	José Hilario López I	125	Málaga	649	Sinaí	119		
	José Hilario López II	170	Altos de Llano grande 2	327	Popular Modelo	418		
	Simón Bolívar	625			La Julia	319		

Fuente: Adaptado de Orozco y Guzmán (2014). Informe de investigación denominado "Análisis territorial estratégico para la planificación de la vivienda social bajo criterios de sustentabilidad en la ciudad de Pereira"

Tabla 3. Unidades habitacionales de vivienda social en las comunas y barrios de la ciudad de Pereira.

Como se mencionó anteriormente, estos datos se agruparon en conglomerados o clúster según la homogeneidad de las variables estudiadas por Orozco y Guzmán (2014) para la ciudad de Pereira, constituyendo tres tamaños diferentes para los proyectos habitacionales a partir del número de viviendas, con el propósito de agrupar las diversas escalas barriales existentes en la ciudad de Pereira, y proyectar los impactos potenciales evaluados.

El análisis de conglomerados o clúster como un método estadístico multivariante de clasificación, permite, a partir de un conjunto de datos, situarlos en grupos homogéneos, de manera que las variables que pueden ser consideradas similares sean asignados a un mismo conglomerado (Peña. 2002).

El análisis de conglomerados utiliza el dendograma como representación gráfica para la interpretación de sus resultados. En el dendograma queda reflejada la formación de los conglomerados, así como las distancias entre ellos.

Los datos obtenidos como resultado de la evaluación de los impactos ambientales de la vivienda convencional, y la vivienda construida con materiales locales, así como aquella que incorpora el aprovechamiento de agua no convencional, planteados en unidades eq por m² o m³ según el caso, fueron escalados a eq. /año para el caso del aprovechamiento a escala barrial de agua no convencional, y a eq. /barrio para el caso del uso de materiales locales.

Estos análisis a nivel barrial tienen por objeto dimensionar la magnitud del impacto ambiental potencial de aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales y el uso de materiales locales (guadua) en la construcción de nueva vivienda. Dicho resultado representa una aproximación limitada por la heterogeneidad que se puede presentar en la tipología de vivienda existente, y los factores ambientales. Sin embargo, considerando estos límites, constituye una estimación del efecto potencial que en la planificación urbana de nuevas intervenciones habitacionales, puede representar sobre la magnitud de los impactos evitados, la implementación de viviendas más sostenibles en los proyectos de vivienda social.

6 RESULTADOS y DISCUSIÓN

6.1 Impactos ambientales potenciales de la vivienda por el uso del agua de red y agua no convencional.

6.1.1 Impactos ambientales potenciales por el uso de agua de red en Pereira.

El análisis de ciclo de vida y la estimación de impactos por el uso de agua de red en la ciudad de Pereira presentó dos escenarios de evaluación, relacionados con los sistemas de distribución del agua de red. En el año 2014, el volumen de agua distribuida en Pereira por gravedad fue de 33.806.076 m³/año, y el agua distribuida por bombeo de 1.641.169 m³/año, representando este último el 4,6% del agua distribuida en la ciudad.

La proporción de agua de red distribuida por bombeo en la ciudad de Pereira no es representativa de las ciudades en Colombia, donde el volumen nacional de agua distribuida por bombeo representa el 77,7% del total de agua de red distribuida para el mismo año.

Lo anterior implicó la realización de una evaluación de impactos ambientales en los dos sistemas (con y sin bombeo), de tal forma que la posible reducción de dichos impactos por el uso de agua lluvia y grises pueda ser contrastada asumiendo los sistemas de distribución existentes.

Se realizó el ACV para 1m³ de distribución de agua en la ciudad de Pereira, con el método CML 2001 V2.05/World, 1990 y el software Simapro, para las categorías de impacto abordadas en este estudio.

Como indicador base para la validación del modelo de evaluación implementado, se utilizó el indicador de impacto relacionado con el potencial de calentamiento global, o Global Warming Potential (en adelante GWP), dado que cuenta con estimaciones previas a nivel local y nacional.

Como resultado, el GWP estimado por este estudio, para la distribución por gravedad de agua de red fue de **0,20 kg CO₂ eq/m³** en la ciudad de Pereira. Este impacto puede incrementar en sistemas de distribución por bombeo.

El impacto del sistema de bombeo de agua de red fue estimado tomando para el consumo energético el valor mínimo de Brasil de energía consumida por m³ de agua facturada (0.7 kWh/m³), como se mencionó en la fase metodológica del presente

estudio; presentando dicho impacto un aumento en el GWP del agua de red de **0,195 kg CO₂ eq/m³** distribuida.

El POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL O GWP obtenido por la distribución de agua de red por gravedad (**0,20 kg CO₂ eq/m³**), presenta un valor cercano al calculado por Varón (2015) de **0,18 kg CO₂ eq/m³** para la Ciudad de Pereira sin considerar sistemas de bombeo.

En sistemas de distribución que involucran en mayor medida sistemas de bombeo, Angrill et al. (2011) y con base a los datos reportados por Muñoz et al. (2010), encuentra que el GWP en un agua de grifo convencional en España es de **0,81 kg CO₂ eq. /m³**, presentando en dicho estudio un menor impacto la producción que la distribución. Morales-Pinzón et al. (2011) simula escenarios para diferentes zonas urbanas de Colombia, considerando la predominancia de sistemas de distribución por bombeo, encontrando un GWP para el agua de red entre **1,18 y 1,27 kg CO₂ eq. / m³**.

El impacto del uso de sistemas de bombeo no se limita a la distribución en la red de acueducto; Kenway y otros, (2011), citados por Ferro (2015), respecto de las bombas elevadoras, destacan que elevar el agua 6 pisos de un inmueble vertical implica un gasto energético de 0,14 kWh/m³ adicionales, lo que implicaría un aumento del GWP en **0.039 kg CO₂ eq. / m³** consumido. Lo anterior explica valores más altos en ciudades con muchos edificios de altura, donde se incrementa el consumo energético, y en ciudades dispersas geográficamente y con un sistema de abastecimiento centralizado, donde la necesidad del bombeo horizontal por las largas distancias también puede ser significativa, razón por la cual en las ciudades intermedias y capitales de Colombia el porcentaje de agua distribuida por bombeo es significativo (Barranquilla con 94%, Cali con 82%, Medellín con 32%, y Santa Martha 24%), y un promedio nacional para Colombia de un 70%.

Contando con un nivel de impacto por m³ de agua de red consistente con los estudios realizados por otros autores, se realizó el análisis de ciclo de vida y la estimación de los impactos potenciales para un tiempo de vida del sistema de 50 años.

El potencial de calentamiento global o GWP por sus siglas en inglés, presento para el ciclo de vida de la vivienda convencional analizada un impacto superior si se considera un sistema que utiliza bombeo, superando en 1793.13 kg CO₂ eq/50 años el impacto ambiental generado por los sistemas de distribución por gravedad (Figura 1).

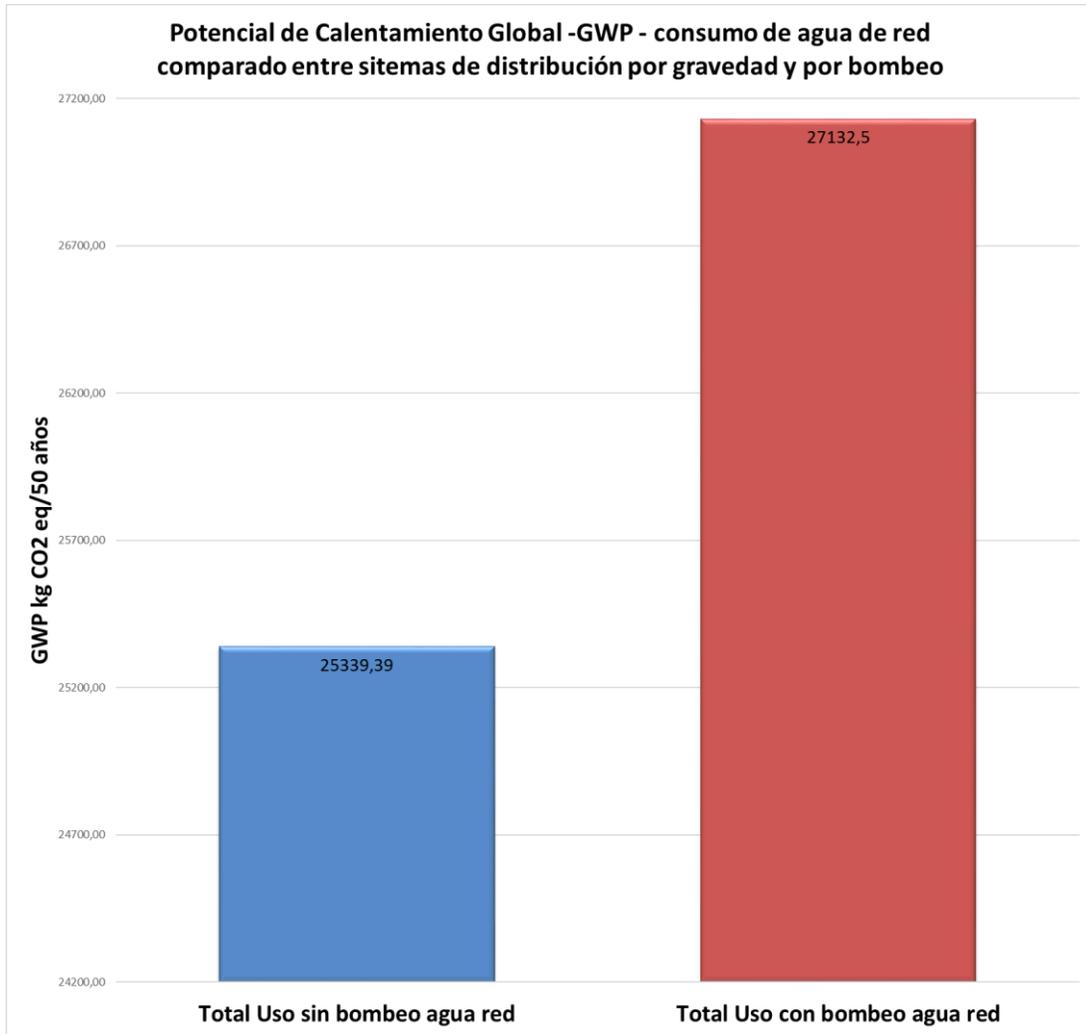


Figura 1. Potencial de calentamiento global por el uso de agua de red en sistemas de distribución con y sin bombeo.

El impacto en la distribución de agua de red esta entonces determinado en gran medida por el consumo y eficiencia energética en el ciclo de vida del sistema, donde el consumo de energía representó en el caso del potencial de calentamiento global, la toxicidad humana, la eutrofización, la oxidación fotoquímica y en mayor medida la ecotoxicidad terrestre, un nivel de impacto de casi iguales proporciones al de consumo de agua (ver Figura 2).

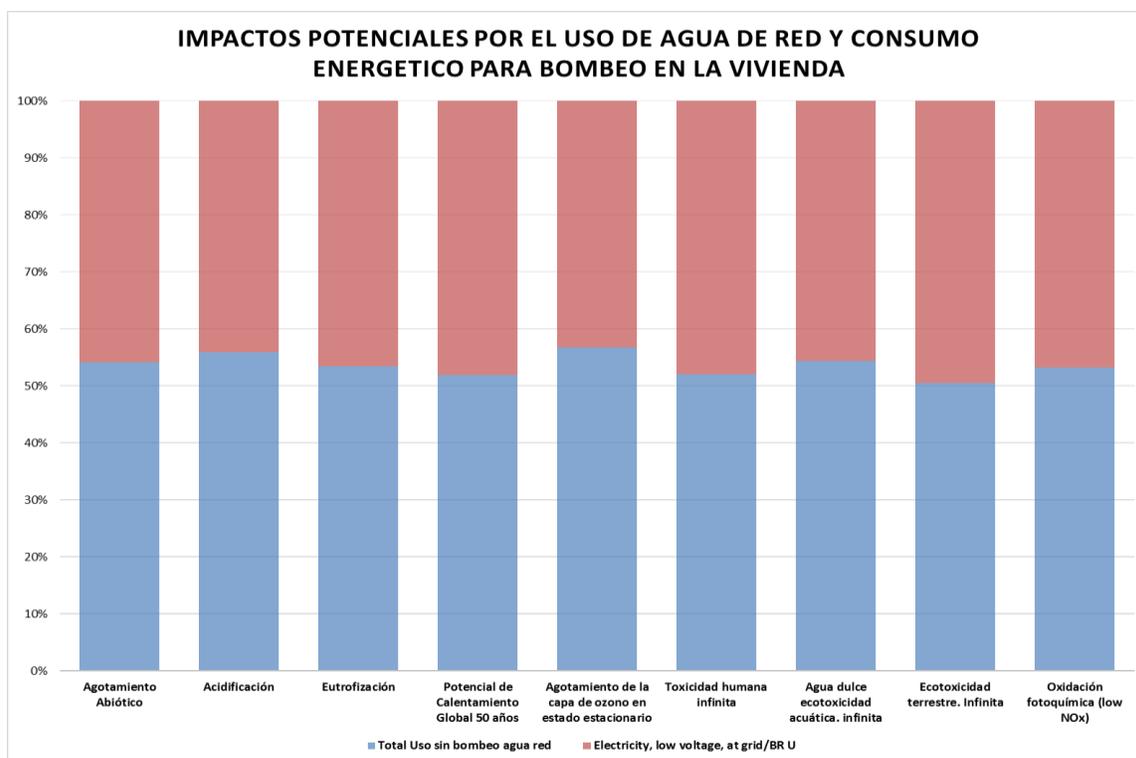


Figura 2. Impactos ambientales potenciales por el uso de agua de red y consumo energético para bombeo de agua.

La utilización de sistemas de bombeo para la distribución y uso de agua de red en la vivienda, implica un aumento de en promedio 6.6% en los impactos evaluados, presentando mayor afectación en el potencial de calentamiento global, la toxicidad humana y terrestre (Tabla 4).

Categoría de impacto evaluada	Unidad/50 años	Impacto por uso de agua de red sin bombeo	Impacto por uso de agua de red con bombeo	% aumento de impacto por uso de bombeo
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq	80,55	85,78	6,49%
Acidificación	kg SO2 eq	48,35	51,27	6,05%
Eutrofización	kg PO4 eq	18,72	19,98	6,68%
Potencial de Calentamiento Global 100 años	kg CO2 eq	25339,4	27132,5	7,08%
El agotamiento de la capa de ozono en estado estacionario	kg CFC-11 eq	0,00116	0,00123	5,84%
Toxicidad humana infinita	kg 1,4-DB eq	14457,6	15480,9	7,08%
Agua dulce ecotoxicidad acuática. infinita	kg 1,4-DB eq	4358,6	4639,6	6,45%
Ecotoxicidad terrestre. Infinita	kg 1,4-DB eq	847,8	911,3	7,49%
Oxidación fotoquímica (low NOx)	kg C2H4 eq	2,46	2,62	6,73%

Tabla 4. Aumento en los Impactos ambientales potenciales por el uso de sistemas de bombeo en la distribución y uso de agua de red en la vivienda.

Los resultados obtenidos evidencian que el consumo de energía asociado al sistema de bombeo del agua, es determinante en la evaluación de impacto del uso de agua lluvia y grises, dado que su utilización para el aprovechamiento de estos recursos hídricos no convencionales, sumado a los impactos dicho aprovechamiento representa, puede causar un impacto ambiental mayor que el del agua de red en sistemas que operan por gravedad.

A continuación, se presentan los resultados para los impactos ambientales evaluados en las dos viviendas abordadas en este estudio, estableciendo diferencias significativas entre la vivienda convencional y la vivienda que considera el aprovechamiento de aguas lluvias y grises.

6.1.2 Impactos ambientales potenciales de la vivienda con sistema de reutilización de aguas grises.

Tomando como referencia los parámetros de diseño planteados por Morales-Pinzón et al. (2013), definidos en la Tabla 5, y en concordancia con lo afirmado Morales-Pinzón (2015), “para obtener una capacidad de almacenamiento óptimo en el sistema de aprovechamiento de aguas grises, basta con encontrar el tamaño de almacenamiento necesario para satisfacer el 100% de la demanda con la infraestructura mínima requerida”, se evaluó el aprovechamiento de aguas grises con una capacidad mínima de almacenamiento de 0,5m³, con un potencial de suministro del 100% de la demanda de aguas grises para uso en inodoro, para un sistema de una vivienda unifamiliar tipo casa. La definición de un volumen de almacenamiento como factor determinante en la realización de los análisis, atiende a lo planteado por Morales-Pinzón (2015), quien afirma que “la capacidad de almacenamiento del agua no convencional es una de las variables que más puede afectar los impactos ambientales potenciales”.

Parámetro de diseño para el aprovechamiento de agua lluvia y agua gris	Datos para una vivienda unifamiliar tipo casa
Demanda doméstica de agua (L/día)	503
Demanda doméstica de agua de lluvia (uso en lavado de ropa) (L/día)	136
Demanda doméstica de agua gris (uso en inodoros) (L/día)	101
Superficie de captación (m ²)	45
Hogares	1
Habitantes	4
Coefficiente de escorrentía (0-1)	0.9
Escorrentía superficial inicial (mm)	1
Coefficiente de filtración (0-1)	0.9

Fuente: Datos sugeridos por Morales Pinzón et al. (2013)

Tabla 5. Valores de diseño para simular el sistema de aprovechamiento de agua no convencional.

Los resultados presentaron para el aprovechamiento de agua gris en la vivienda convencional evaluada, un potencial de calentamiento global (GWP) de **0.119 kg CO₂ eq/m³**, con una desviación de 1.42E-17 y un error de 3.18E-18. Lo anterior implica que para el ciclo de vida del sistema el GWP representa **218.9 kg CO₂ eq** en 50 años. Estos valores y los de las otras categorías de impacto abordadas para el aprovechamiento de agua gris pueden apreciarse en la Tabla 6.

Categoría de impacto	Unidad	Impacto por m3 agua gris suministrada (500 L depósito) sin bombeo	Impacto agua gris en 50 años
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq	0,001885	3,46
Acidificación	kg SO ₂ eq	0,000438	0,80
Eutrofización	kg PO ₄ eq	0,000077	0,14
Potencial de Calentamiento Global 100 años	kg CO ₂ eq	0,119	218,92
El agotamiento de la capa de ozono en estado estacionario	kg CFC-11 eq	0,0000000016	0,0000028
Toxicidad humana infinita	kg 1,4-DB eq	0,047	85,67
Agua dulce ecotoxicidad acuática. infinita	kg 1,4-DB eq	0,016	28,92
Ecotoxicidad terrestre. Infinita	kg 1,4-DB eq	0,00015	0,28
Oxidación fotoquímica (low NOx)	kg C ₂ H ₄ eq	0,00002	0,05

Tabla 6. Impactos ambientales potenciales por el uso de agua gris en la vivienda sin sistemas de bombeo.

El impacto ambiental por el uso de agua gris, comparado con el generado por el agua de red, es menor en 8 de los 9 impactos evaluados, presentando un mayor impacto el uso de agua gris en la categoría de agotamiento abiótico (un 40% mayor), mientras el agotamiento de la capa de ozono y la eco toxicidad terrestre, presentaron en el uso de agua gris su mayor reducción (95 y 92% respectivamente) comparada con el uso de agua de red (Figura 3).

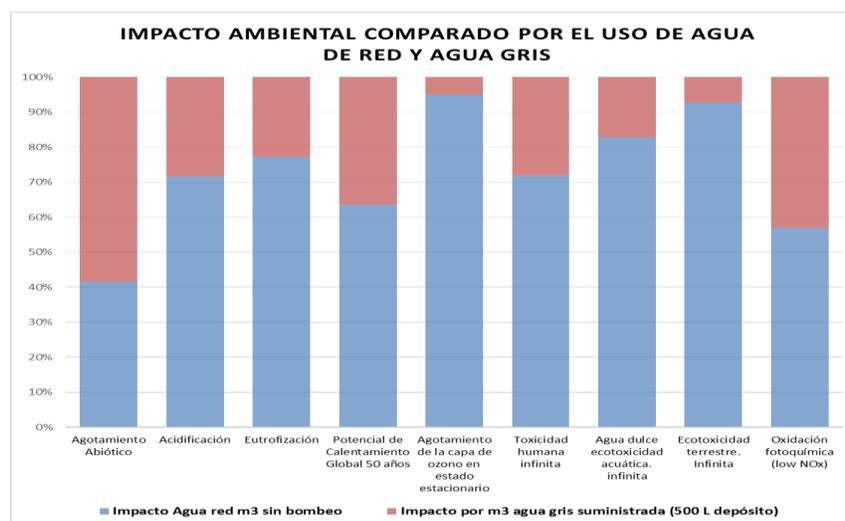


Figura 3. Impacto ambiental comparado. Uso de agua gris vs agua de red en la vivienda.

El potencial de calentamiento global se reduce en 43% por el uso de agua gris según los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos para el impacto ambiental potencial del aprovechamiento de agua gris en una vivienda, se encuentran por debajo de los valores estimados por otros estudios donde fueron considerados sistemas asistidos por bombeo.

Morales-Pinzón, M. Gasol, Gabarrell, & Rieradevall, (2013), consideraron, por ejemplo, que, bajo las condiciones de depósitos óptimos, los impactos potenciales ambientales de gases de efecto invernadero por su potencial de calentamiento global (Global Warming Potential - GWP) en el sistema de reutilización de aguas grises se estiman entre 0,67 y 1,43 kg CO₂ eq. /m³ (de agua gris usada en el sistema) para el sistema vivienda unifamiliar tipo casa.

6.1.3 Impactos ambientales potenciales de la vivienda con sistema de cosecha de agua lluvia.

Usando los parámetros de diseño definidos en la Tabla 5, y considerando un sistema con capacidad óptima de almacenamiento de 1 m³ de agua, con distribución por gravedad, se estimó el potencial impacto ambiental del sistema de aprovechamiento de agua de lluvia.

Utilizando el software Plugrisost desarrollado por Morales-Pinzón T. Rieradevall, M. Gasol, & Gabarrell, (2012b) se obtiene como resultado para el aprovechamiento de agua lluvia en la vivienda convencional evaluada, un potencial de calentamiento global (GWP) de **0.1217 kg CO₂ eq/m³**, con una desviación de 0.004 y un error de 0.001, lo que indica un % de error de 0,8. Lo anterior implica que para el ciclo de vida del sistema el GWP representa **263.3 kg CO₂ eq** en 50 años. Estos valores y los de las otras categorías de impacto abordadas para el aprovechamiento de agua lluvia pueden apreciarse en la Tabla 7.

Categoría de impacto	Unidad	Impacto por m3 agua Lluvia suministrada (1000 L depósito)	Impacto agua lluvia en 50 años
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq	1,92E-03	4,16
Acidificación	kg SO ₂ eq	4,47E-04	0,97
Eutrofización	kg PO ₄ eq	7,87E-05	0,17
Potencial de Calentamiento Global 100 años	kg CO ₂ eq	0,1217	263,30
El agotamiento de la capa de ozono en estado estacionario	kg CFC-11 eq	1,60E-09	3,47E-06
Toxicidad humana infinita	kg 1,4-DB eq	0,048	103,45
Agua dulce ecotoxicidad acuática. infinita	kg 1,4-DB eq	0,016	34,86
Ecotoxicidad terrestre. Infinita	kg 1,4-DB eq	1,55E-04	0,33
Oxidación fotoquímica (low NOx)	kg C ₂ H ₄ eq	2,52E-05	0,05

Tabla 7. Impactos ambientales potenciales por el uso de agua lluvia en la vivienda sin sistemas de bombeo.

Los resultados obtenidos para el aprovechamiento de agua lluvia, evidencian un aumento de en promedio 21% sobre el valor del impacto con respecto al resultado obtenido para el aprovechamiento de agua gris, para 8 de los 9 impactos abordados. El impacto de oxidación fotoquímica presenta un aumento del 9% con respecto al impacto obtenido por el aprovechamiento de agua gris.

El impacto ambiental por el uso de agua lluvia, comparado con el generado por el agua de red, conservo las mismas relaciones presentadas para el agua gris, donde se presenta menor en 8 de los 9 impactos evaluados, presentando un mayor impacto el uso de agua lluvia en la categoría de agotamiento abiótico (un 43% mayor), mientras el agotamiento de la capa de ozono y la eco toxicidad terrestre, presentaron en el uso de agua lluvia su mayor reducción (95 y 92% respectivamente) comparada con el uso de agua de red. El potencial de calentamiento global se reduce en 42% por el uso de agua lluvia según los resultados obtenidos.

Otros estudios como el desarrollado por Morales-Pinzón et al. (2013), utilizando datos de Morales- Pinzón et al. (2011) estimaron que el posible impacto potencial ambiental de los sistemas de captación de agua lluvia en una vivienda similar a la evaluada, es de **0,56 kg de CO₂ eq. /m³** (de agua de lluvia usada en el sistema) para capacidades de almacenamiento de 1 m³, considerando en el análisis el uso de sistemas de bombeo.

Frente a la demanda satisfecha, Morales-Pinzón plantea que del total de agua gris que puede ser aprovechada con capacidades de almacenamiento de **0,5m³** es de **37 m³/año** para los sistemas vivienda unifamiliar tipo casa; y con relación al agua de lluvia, se pueden alcanzar valores de demanda satisfecha de **81.7%** para volúmenes de almacenamiento de 1 m³. Esto implica que en el sistema vivienda unifamiliar tipo casa, de los **50 m³/año** de demanda de agua de lluvia, se pueden suministrar **40.5 m³/año**.

Los resultados obtenidos evidencian la importancia del uso del agua de lluvia y gris en la posible disminución del impacto potencial ambiental del consumo doméstico de agua.

6.1.4 Impactos Ambientales potenciales en la vivienda integrando agua doméstica y no convencional.

Usando el software Plugrisost desarrollado por Morales-Pinzón T., Rieradevall, M. Gasol, & Gabarrell, (2012b), y al realizar una evaluación integral de estos sistemas, se obtiene como resultado la estimación de los impactos ambientales potenciales de los sistemas combinados de agua lluvia y grises, y de estos como complemento del agua de red consumida en la vivienda (Tabla 8).

Categoría de impacto	Unidad	Impacto por m3 agua		Impacto en 50 años					% cambio en el impacto generado
		Impacto agua no convencional suministrada (500L gris y 1000L lluvias depósito)	Impacto agua red en Pereira	Impacto agua no convencional	Impacto agua de red en sistema combinado	Impacto agua de red + agua gris + agua lluvia	Impacto agua de red sin aprovechamiento de agua no convencional	Impacto evitado por el uso de agua no convencional	
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq	0,0019	0,0013	7,62	6,96	14,58	12,34	-2,25	-18%
Acidificación	kg SO ₂ eq	0,0004	0,0011	1,77	5,77	7,54	10,22	2,68	26%
Eutrofización	kg PO ₄ eq	0,0001	0,0003	0,31	1,36		2,41	0,74	31%
Potencial de Calentamiento Global 100 años	kg CO ₂ eq	0,1205	0,2090	482,05	1082,99	1565,04	1918,92	353,88	18%
El agotamiento de la capa de ozono en estado estacionario	kg CFC-11 eq	1,60E-09	2,99E-08	6,30E-06	1,55E-04	1,61E-04	2,74E-04	1,13E-04	41%
Toxicidad humana infinita	kg 1,4-DB eq	0,0473	0,1205	189,05	624,45	813,50	1106,45	292,95	26%
Agua dulce ecotoxicidad acuática. infinita	kg 1,4-DB eq	0,0159	0,0760	63,76	393,91	457,67	697,95	240,28	34%
Ecotoxicidad terrestre. Infinita	kg 1,4-DB eq	0,0002	0,0020	0,61	10,16	10,77	18,00	7,23	40%
Oxidación fotoquímica (low NOx)	kg C ₂ H ₄ eq	2,50E-05	3,26E-05	0,1	0,17	0,27	0,30	0,03	10%

Tabla 8. Impactos Ambientales potenciales en la vivienda integrando agua doméstica y no convencional.

El impacto potencial ambiental del agua de red del sistema de abastecimiento de agua de la ciudad de Pereira, estimado para este estudio sin considerar sistemas de bombeo es de 0,209 kg de CO₂ eq. por cada m³ de agua suministrada. A partir de este límite se puede encontrar que, al combinar los sistemas de agua de lluvia y aguas grises, sin incorporar sistemas de bombeo, se pueden lograr disminuciones de hasta 0,088 CO₂ eq. por cada m³ de agua utilizada en el sistema, lo que implica una reducción del 42 % sobre el GWP generado por m³ de agua usada. Considerando el ciclo de vida del sistema, el impacto evitado por el uso de agua no convencional para el caso del GWP representa 353,8 kg de CO₂ eq (en 50 años), implicando una reducción del 18% en el posible impacto ambiental. (ver Tabla 8)

El único impacto ambiental que presenta un aumento por el aprovechamiento de agua no convencional es el agotamiento de recursos abióticos, presentando un aumento de 2.25 kg Sb eq en el ciclo de vida del sistema. Los impactos que en mayor medida presentan una disminución son el agotamiento de la capa de ozono, la ecotoxicidad terrestre, acuática y humana, la eutrofización y la acidificación.

Utilizando las capacidades óptimas de almacenamiento, y sin el uso de sistemas de bombeo, se encuentra que el impacto ambiental potencial es tendencialmente menor cuando se presenta una combinación de suministro que incluya las dos fuentes no convencionales de agua para uso doméstico.

Estos resultados se encuentran por debajo de las estimaciones presentadas por Muñoz, Milà-i-Canals, & Fernández-Alba, (2010), quienes indican como cota inferior de impacto potencial ambiental para el tratamiento de un metro cúbico de agua para uso doméstico un valor de 0,32 CO₂ eq., mientras que el solo sistema de “cosecha de agua de lluvia” (RWH)⁷ puede generar un mínimo de 0,53 kg de CO₂ eq. /m³ de agua de lluvia usada en el sistema y 0,63 kg de CO₂ eq. /m³ de agua gris usada en el sistema. Esto puede deberse a la consideración de sistemas de menor complejidad y demanda energética en este estudio.

6.2 Impactos ambientales potenciales de la vivienda por el uso de materiales locales (Guadua).

Como caso de estudio, se presenta el análisis de una vivienda unifamiliar construida con material no convencional (*Guadua*)⁸ que se puede considerar representa las condiciones medias de superficie de captación de agua de lluvia de la vivienda nueva de baja densidad en Colombia según Morales-Pinzón et al. (2012a).

En cuanto al potencial uso de materiales locales, es importante comparar el porcentaje de uso de los principales elementos usados en la vivienda, así, a partir de datos planteados por Morales-Pinzón et al. (2014c), y Ortiz-Rodríguez, Castells, & Sonnemann, (2010), se establece como el uso de materiales locales como la guadua puede sustituir un porcentaje importante de ladrillo, mortero, cemento y acero, implicando la reducción de impactos ambientales.

Considerando solamente los materiales de construcción, el impacto potencial ambiental de gases efecto de invernadero estimado en este estudio para una vivienda construida con materiales convencionales fue de **1037,31 kg CO₂ eq. /m²**, el cual reemplazando algunos de estos materiales por Guadua, se reduce a **845,5 kg CO₂ eq. /m²**, donde el 30% correspondió al impacto de la fase de construcción, representada por una carga ambiental potencial de **261,7 kg CO₂ eq. /m²**.

⁷ En inglés el acrónimo RWH significa Rainwater Harvesting y se usa como término común para describir los sistemas de captación y aprovechamiento de agua de lluvia.

⁸ Es un bambú leñoso con predominancia de crecimiento en el Eje Cafetero Colombiano y reconocido por el Reglamento de Diseño Sismo Resistente NSR-10 en el Capítulo G.12 como apto para edificaciones tipo vivienda que usan en su estructura guadua como material principal para alturas máximas de dos pisos.

Los impactos totales de la vivienda convencional y la vivienda que utiliza materiales locales de construcción, incluyendo el uso de los recursos hídricos no convencionales evaluados, se presentan en la Tabla 9, evidenciando un impacto mayor en la fase de uso para la vivienda más sostenible, y un impacto menor en la fase de construcción y deconstrucción frente a la vivienda convencional.

Categoría de impacto	Unidad	Construcción		Uso				Deconstrucción	
		Vivienda más sostenible	Vivienda Convencional	Total, sin bombeo		Total, con bombeo		Vivienda más sostenible	Vivienda Convencional
		Total	Total	Vivienda más sostenible	Vivienda Convencional	Vivienda más sostenible	Vivienda Convencional	Total	Total
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq	69,02	84,05	82,8	80,6	85,8	85,8	1,9	3,9
Acidificación	kg SO ₂ eq	34,66	42,85	45,7	48,3	47,3	51,3	2,3	5,0
Eutrofización	kg PO ₄ eq	12,73	16,27	18,0	18,7	18,7	20,0	16,0	36,3
Potencial de Calentamiento Global 100 años	kg CO ₂ eq	11776,55	16642,74	24985,7	25339,4	25997,7	27132,5	2898,3	6615,9
El agotamiento de la capa de ozono en estado estacionario	kg CFC-11 eq	0,001	0,001	0,0010	0,0012	0,0011	0,0012	0,00004	0,00009
Toxicidad humana infinita	kg 1,4-DB eq	18257,71	22306,91	14164,7	14457,6	14742,3	15480,9	1210,3	2665,1
Agua dulce ecotoxicidad acuática. infinita	kg 1,4-DB eq	4418,91	5373,05	4118,3	4358,6	4276,9	4639,6	11950,6	27335,2
Ecotoxicidad terrestre. Infinita	kg 1,4-DB eq	39,77	45,96	840,6	847,8	876,4	911,3	9,4	21,5
Oxidación fotoquímica (low NOx)	kg C ₂ H ₄ eq	2,51	3,29	2,4	2,5	2,5	2,6	0,9	2,2

Tabla 9. Impactos totales del ciclo de vida de la vivienda convencional y la vivienda más sostenible de 45 m² (incorporando uso de agua no convencional y materiales locales como la Guadua)

Otro resultado importante es el aumento en el impacto en la fase de uso, en el escenario en que se utiliza bombeo para la distribución de agua lluvia en el sistema, lo cual en algunos impactos implicó casi igualar el valor obtenido en la vivienda más sostenible, con el de la vivienda convencional en un sistema sin bombeo de agua, como es el caso de la ciudad de Pereira (ver Tabla 9).

Los impactos en la fase de construcción fueron mayores para la vivienda convencional en todas las categorías evaluadas, en el ciclo de vida de la vivienda (ver Figura 4).

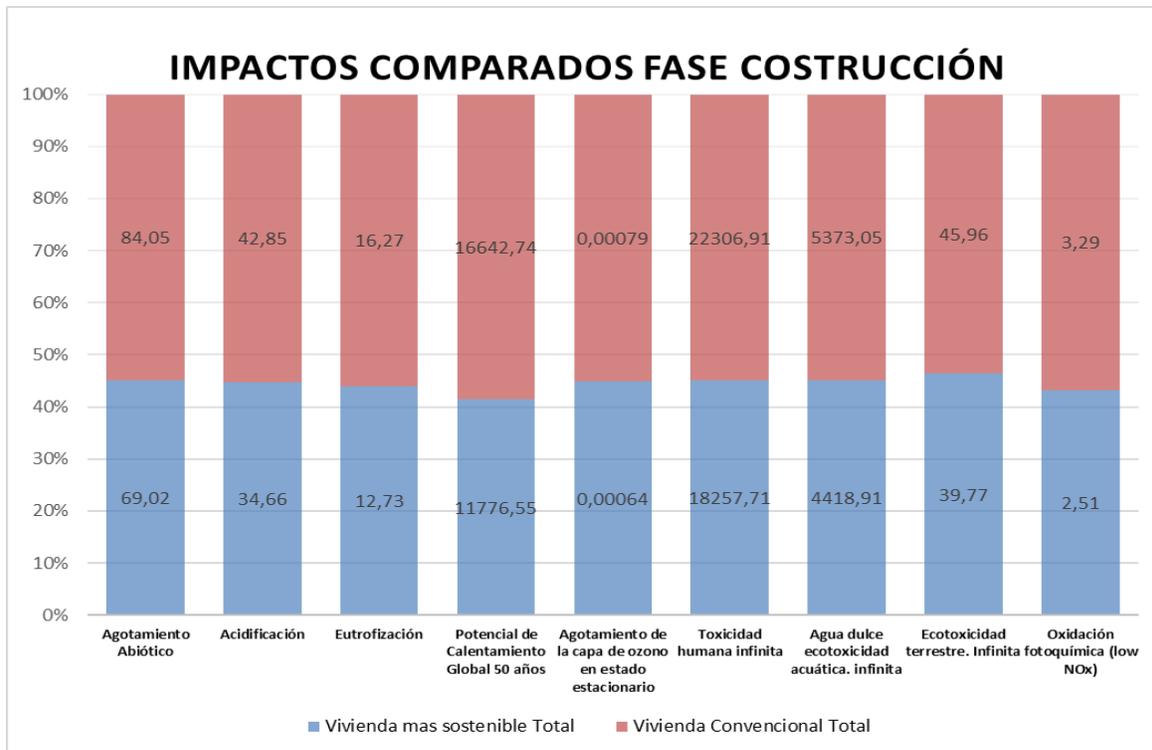


Figura 4. Impactos ambientales potenciales en la fase de construcción de la vivienda convencional y la vivienda más sostenible.

La fase de uso de la vivienda, sin considerar sistemas de bombeo e incorporando el aprovechamiento de agua no convencional en la vivienda más sostenible, presenta en 8 de los 9 impactos evaluados un menor impacto en la vivienda más sostenible, con respecto a la vivienda convencional (construida con materiales convencionales y que solo usa agua de red). El impacto que presenta mayor magnitud en la vivienda más sostenible en esta fase es el de agotamiento de recursos abióticos (Figura 5).

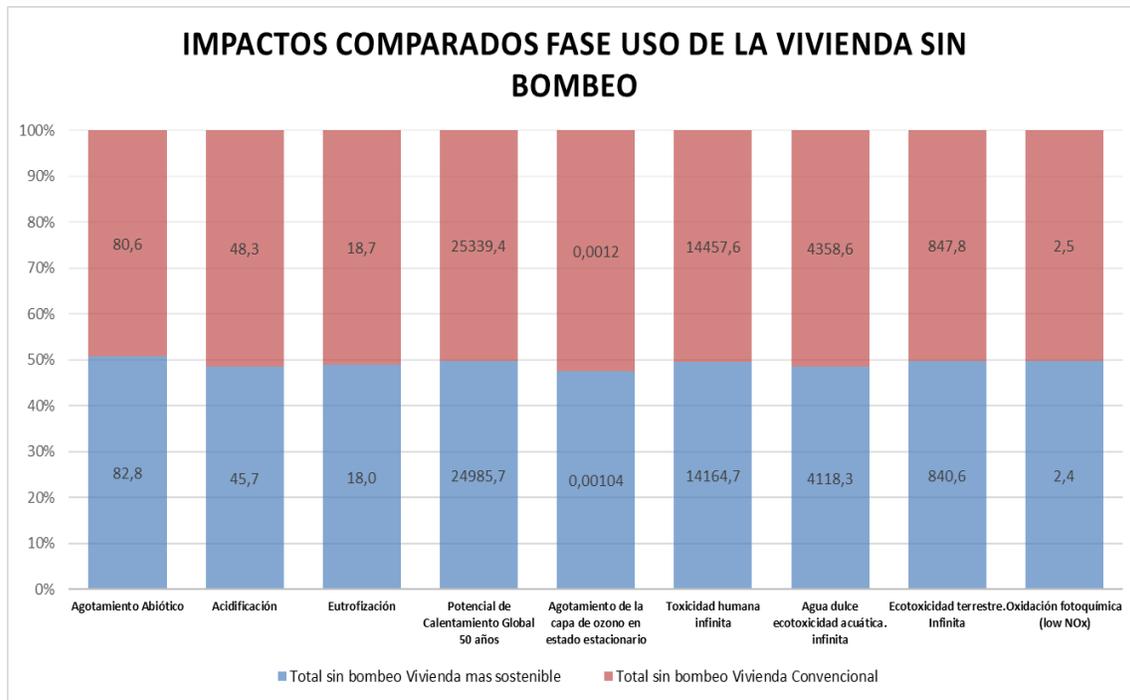


Figura 5. Impactos ambientales potenciales en la fase de uso de la vivienda convencional y la vivienda más sostenible.

La fase final del ciclo de vida del sistema, entendida como deconstrucción de la vivienda, presenta en todos los impactos evaluados un menor valor en la vivienda más sostenible, con respecto a la vivienda convencional, representando el uso de la Guadua como material de construcción y el aprovechamiento de agua no convencional una reducción de en promedio 55% de los impactos generados en esta fase del ciclo de vida de la vivienda (Figura 6).

El comportamiento de cada uno de los indicadores de impacto evaluados en las fases del ciclo de vida de los dos sistemas de vivienda abordados, presenta para el caso del GWP, un mayor impacto en la fase de uso, seguida de la fase de construcción y deconstrucción. Este resultado es similar en 6 de los 9 impactos evaluados en la vivienda más sostenible, siendo la ecotoxicidad humana y la oxidación fotoquímica impactos que en mayor proporción se presentan en la fase de construcción, y la ecotoxicidad del agua en la fase de deconstrucción como puede apreciarse en la Figura 7.

Para el caso de la vivienda más sostenible, el POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL -GWP. presentó un mayor impacto en la fase de uso con 24985,6 kg CO₂ eq. /50 años (63% del impacto sobre el ciclo de vida de la vivienda), seguido por la fase de construcción con 11776,5 kg CO₂ eq. /50 años (30%), y la fase de deconstrucción con 2898,3 kg CO₂ eq. /50 años (7%) (ver Figura 7).

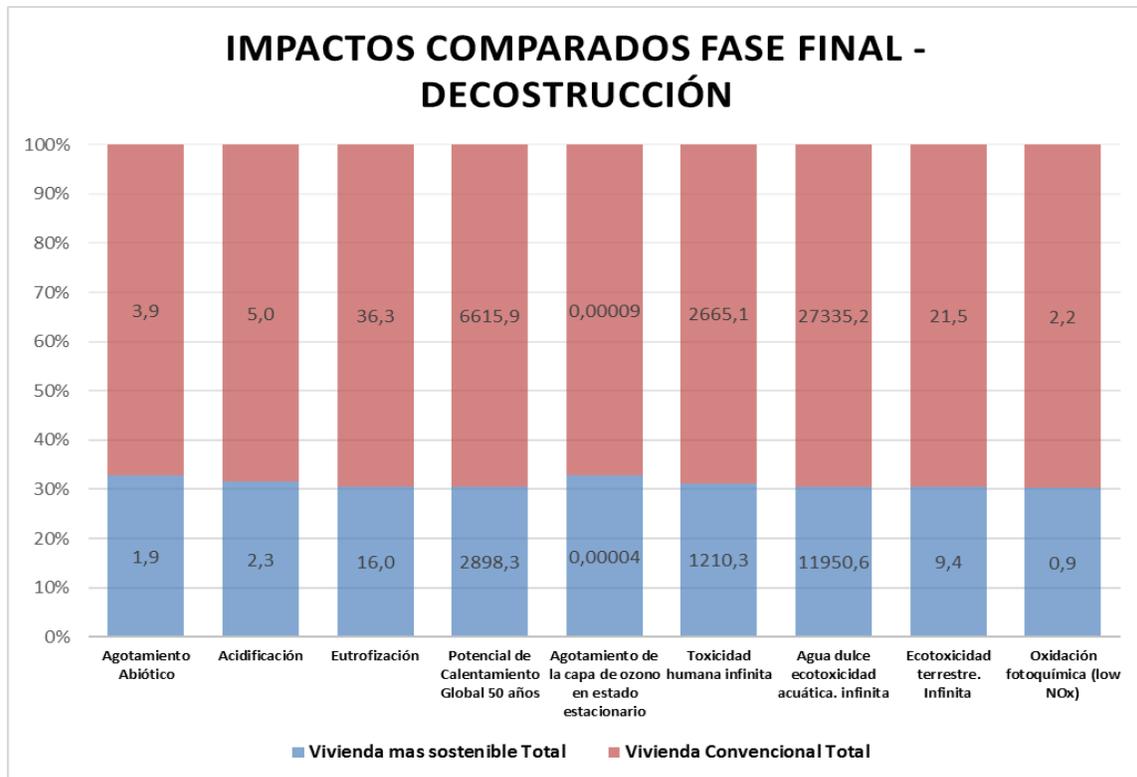


Figura 6. Impactos ambientales potenciales en la fase de deconstrucción de la vivienda convencional y la vivienda más sostenible.

En la vivienda convencional, aunque con mayores impactos, el comportamiento fue similar para el POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL -GWP., presentando un mayor impacto en la fase de uso con 25339,3 kg CO₂ eq. /50 años (52% del impacto sobre el ciclo de vida de la vivienda), seguido por la fase de construcción con 16642,7 kg CO₂ eq. /50 años (34%), y la fase de deconstrucción con 6615,8 kg CO₂ eq. /50 años (14%) (ver Figura 7).

Una de las causas principales para el impacto y proporción de la fase de uso en ambas viviendas es el POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL -GWP. (23420,4 kg CO₂ eq. /50 años) generado por el consumo energético, el cual representa el 94% del impacto en esta fase del ciclo de vida de la vivienda. Cabe mencionar que este consumo fue estimado en 1680 kWh/año, a partir del consumo medio de una vivienda conforme a lo parámetros definidos en la Tabla 2, y basados en los datos de electricidad en Colombia según información procedente del Sistema Interconectado Nacional de Colombia y su Unidad de Planeación Minero Energética – UPME (2014).

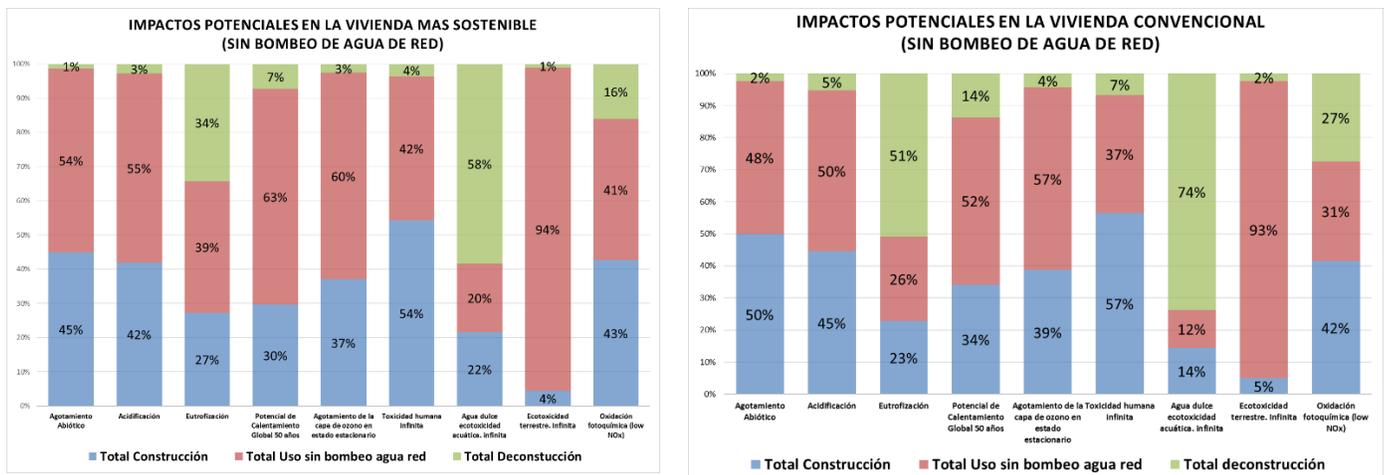


Figura 7. Impactos ambientales potenciales en el ciclo de vida de la vivienda convencional y la vivienda más sostenible.

En la vivienda más sostenible, los principales factores que aportan a los impactos en la fase de construcción son el cemento mortero (31%), el acero (25%), la cerámica sanitaria (18% sobre el total de impactos de esta fase del ciclo de vida). Para el caso de la vivienda convencional, los principales factores están relacionados con el consumo de concreto (41%), el acero (22%), el ladrillo (11%) y la cerámica sanitaria (13%).

Comparando los sistemas a partir de los impactos totales obtenidos de las tres fases del ciclo de vida de la vivienda, el POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL -GWP. presentó una reducción en la vivienda más sostenible del 18% (8937,5 kg CO₂ eq. evitados), comparada con la vivienda convencional. Los impactos que mayor reducción presentan son la ecotoxicidad del agua (45% de reducción), la eutrofización (31%) y la oxidación fotoquímica (26%) como puede verse en la Tabla 10.

Categoría de impacto	Unidad	Total, impacto vivienda más sostenible escenario agua red sin bombeo	Total, impacto vivienda convencional escenario agua red sin bombeo	Impacto evitado	%
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq	153,7	168,5	14,8	9%
Acidificación	kg SO ₂ eq	82,6	96,2	13,6	14%
Eutrofización	kg PO ₄ eq	46,7	71,3	24,6	34%
Potencial de Calentamiento Global 100 años	kg CO ₂ eq	39660,5	48598,0	8937,5	18%
El agotamiento de la capa de ozono en estado estacionario	kg CFC-11 eq	0,00173	0,00203	0,00031	15%
Toxicidad humana infinita	kg 1,4-DB eq	33632,7	39429,6	5796,9	15%
Agua dulce ecotoxicidad acuática, infinita	kg 1,4-DB eq	20487,8	37066,8	16579,0	45%
Ecotoxicidad terrestre, infinita	kg 1,4-DB eq	889,8	915,2	25,4	3%
Oxidación fotoquímica (low NOx)	kg C ₂ H ₄ eq	5,9	7,9	2,0	26%

Tabla 10. Impactos totales ciclo de vida de las viviendas convencional y más sostenible.

El Análisis de Ciclo de Vida mostró diferencias entre los dos sistemas construidos, en las tres etapas del ciclo de vida, implicando un menor impacto para la vivienda construida con materiales locales y que incorpora fuentes de agua no convencional; frente a la vivienda convencional en la ciudad de Pereira.

6.3 Aproximación a los efectos y potencialidades en el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales y el uso de materiales locales (guadua) para la construcción de nueva vivienda a escala barrial.

6.3.1 Escala de análisis barrial en la vivienda social de la ciudad de Pereira.

A partir de los resultados obtenidos en los apartes anteriores de este documento, se configura un conjunto de datos relacionados con el potencial de impacto ambiental de la vivienda unifamiliar, que escalados a nivel barrial podrían ser considerados como una aproximación al impacto potencial de los modelos de ocupación territorial de la ciudad de Pereira. Dicho resultado representa una aproximación limitada por la heterogeneidad que se puede presentar en la tipología de vivienda existente, y los factores ambientales. Sin embargo, considerando estos límites, constituye una estimación del efecto potencial que, en la planificación urbana de nuevas intervenciones habitacionales, puede representar sobre la magnitud de los impactos evitados, la implementación de viviendas más sostenibles en los proyectos de vivienda social

Esta aproximación parte de los proyectos habitacionales construidos actualmente, y pretende establecer un referente que permita según la magnitud del proyecto (medida para este estudio a partir del número de soluciones habitacionales que lo conforman), establecer el impacto potencial generado y evitado si se considera la incorporación de materiales locales (Guadua) y el uso de recursos hídricos no convencionales (lluvia y aguas grises) en la configuración de una vivienda social más sostenible y en consecuencia proyectos constructivos ambientalmente menos impactantes.

Cabe mencionar que la utilización de materiales locales (guadua) fue considerada solo para proyectos de vivienda social del tipo unifamiliar, donde además se consideró el uso de recursos hídricos no convencionales.

Los parámetros que se retoman de los resultados citados en este documento se presentan en la Tabla 11.

Categoría de análisis	Parámetro	Unidades	Valor
Demanda doméstica de agua ¹	Demanda doméstica de agua - vivienda unifamiliar		183,6
Demanda de agua lluvia y gris ²	Demanda satisfecha agua gris (Vivienda unifamiliar con capacidad de almacenamiento de 0,5m3)	m ³ /año vivienda	37
	Demanda satisfecha agua lluvia (vivienda unifamiliar con capacidad de almacenamiento de 1m3)		40,5
Potencial de emisiones de gases de efecto invernadero por consumo de agua de fuentes no convencionales y agua de red.	Potencial de calentamiento global (GWP) agua red Pereira	kg CO ₂ eq. / m ³ de agua de red	0.2
	Potencial de calentamiento global (GWP) agua lluvia. sistema vivienda unifamiliar tipo casa	kg de CO ₂ eq. / m ³ de agua de lluvia utilizada	0,121
	Potencial de calentamiento global (GWP) agua gris - sistema vivienda unifamiliar tipo casa	kg CO ₂ eq. / m ³ de agua gris usada en el sistema	0,119
	Potencial de calentamiento global (GWP) todos los sistemas (promedio) en vivienda unifamiliar	kg CO ₂ eq. / m ³	0.1205
Impacto potencial evitado	Potencial de calentamiento global (GWP) evitado agua lluvia. sistema vivienda unifamiliar tipo casa	kg de CO ₂ eq. / m ³ de agua de lluvia utilizada	0,079
	Potencial de calentamiento global (GWP) evitado agua gris sistema vivienda unifamiliar tipo casa	kg CO ₂ eq. / m ³ de agua gris usada en el sistema	0,081
Potencial de Calentamiento Global (GWP) vivienda según materiales de construcción y recursos hídricos utilizados	Potencial de calentamiento global (GWP) de una vivienda convencional		1080
	Potencial de calentamiento global (GWP) de una vivienda con materiales locales y recursos hídricos no convencionales		881,3
	Etapa construcción. potencial de calentamiento global (GWP) de una vivienda con materiales locales y recursos hídricos no convencionales		261,7
	Etapa uso. potencial de calentamiento global (GWP) de una vivienda con materiales locales y recursos hídricos no convencionales	kg CO ₂ eq. / m ² de área construida	555,23
	Etapa final vida útil. potencial de calentamiento global (GWP) de una vivienda con materiales locales y recursos hídricos no convencionales		64,4
	Potencial de calentamiento global (GWP) evitado por uso de bambú		233,5
	Potencial de calentamiento global (GWP) evitado por uso de bambú y recursos hídricos no convencionales		198,7

Fuente: Resultados de los análisis a escala vivienda presentados en este estudio y estimaciones planteadas por Morales-Pinzón et al. (2015).

(1). Demanda doméstica satisfecha de agua lluvia y gris estimada con capacidades de almacenamiento de 0,5 m³ para viviendas unifamiliares, según lo planteado por Morales-Pinzón et al. 2013 y definidas en la Tabla 5

(2). Demandas domesticas planteadas originalmente en L/día por Morales-Pinzón et al. 2013 y definidas en la Tabla 5.

Tabla 11. Categorías de análisis y parámetros considerados para la estimación a escala barrial del potencial de impacto ambiental.

Con el propósito de definir una escala barrial para el análisis de los parámetros considerados al nivel de vivienda, se realizó un análisis de conglomerados o clúster a partir de las variables e información desarrollada por Orozco y Guzmán (2014) para los proyectos de vivienda social en la ciudad de Pereira. Este análisis considero información relacionada con la tipología de materiales de construcción y el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales en 91 barrios de vivienda social del municipio.

El análisis de conglomerados o clúster como un método estadístico multivariante de clasificación, según lo plantea Peña (2002), permite, a partir de un conjunto de datos, situarlos en grupos homogéneos, de manera que las variables que pueden ser consideradas similares sean asignados a un mismo conglomerado.

En el dendrograma obtenido, estandarizando las variables, se puede comprobar, que las variables más cercanas entre sí son la 4 (recolección de agua lluvia), la 5 (uso de agua lluvia para aseo) y la 6 (uso de agua lluvia para jardines), que forman el primer grupo (distancia más próxima a 0), y la 1 (número de viviendas), 7 (uso de agua lluvia para ropas), 3 (material convencional) y la 8 (uso de agua lluvia para baños), que forman el segundo. La variable más distante al resto es la 2 (material bahareque esterilla), ya que es la última (mayor distancia) en incorporarse al clúster final, la cual presenta mayor cercanía a las variables 4 (recolección de agua lluvia), la 5 (uso de agua lluvia para aseo) y la 6 (uso de agua lluvia para jardines), conformando con estas un tercer grupo. Estandarizando las variables, y realizando 3 conglomerados (línea roja), uno de ellos contendría a las variables recolección de agua lluvia, uso de agua lluvia para aseo y uso de agua lluvia para jardines, otro a la variable material bahareque esterilla unida a las anteriores, y el resto de observaciones formarían un grupo (Figura 8).

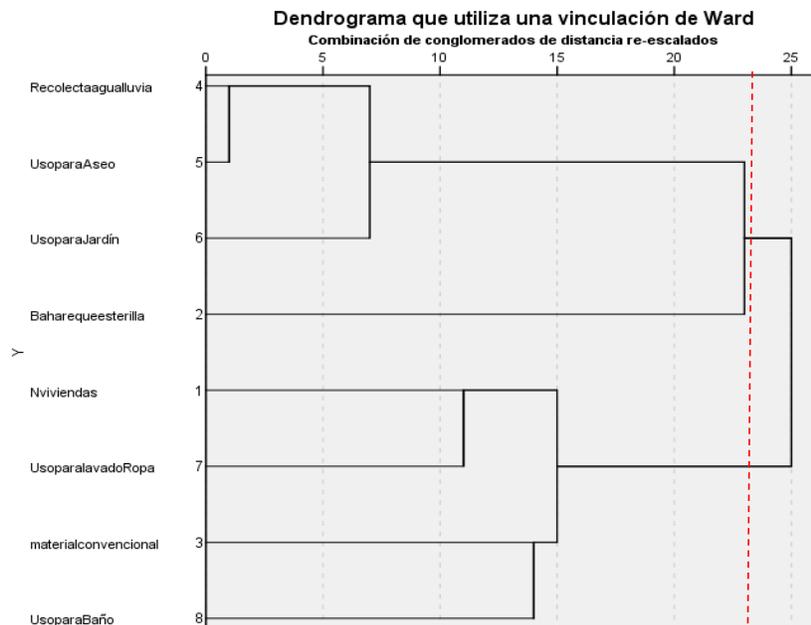


Figura 8. Dendrograma combinación de conglomerados a partir de variables de la vivienda social en la ciudad de Pereira (con estandarización de variables).

La relación entre los datos puede apreciarse con mayor facilidad si no se estandarizan las variables, encontrando mayor peso en la variable que representa el número de viviendas por barrio, y una homogeneidad mayor en las demás variables, que para el análisis incluye elementos adicionales como el estrato y la tipología de la vivienda - uni - bi - multi-familiar (Figura 9).

Las variables homogéneas que conforman los clúster o conglomerados según los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 12.

Clúster	VARIABLES	Descripción
1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vivienda Construida con Bahareque y esterilla - Guadua (2) ▪ Recolección de agua lluvia (4) ▪ Uso de agua lluvia para aseo (5) ▪ Uso de agua lluvia para Jardines (6) 	Este conglomerado representa un barrio con condiciones homogéneas donde es predominante el uso de bahareque y esterilla como material de construcción, y se presenta un aprovechamiento de agua lluvia para el aseo de la vivienda y el mantenimiento de jardines.
2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Número de Viviendas (1) ▪ Vivienda Construida con materiales convencionales (3) ▪ Uso de agua lluvia para lavado de ropas (7) ▪ Uso de agua lluvia para baños (Sanitarios) (8) 	Este conglomerado representa un barrio con condiciones homogéneas donde el número de viviendas es significativo, y los materiales convencionales para la construcción son predominantes; en estos barrios es recurrente el uso de agua lluvia para el lavado de ropas y para sanitarios.
3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recolección de agua lluvia (4) ▪ Uso de agua lluvia para aseo (5) ▪ Uso de agua lluvia para Jardines (6) 	Este conglomerado representa un barrio que realiza un aprovechamiento de aguas lluvias con un uso predominante en aseo y jardines, y cuyos materiales de construcción no presentan una tendencia definida.

Tabla 12. Clúster para el análisis de datos barriales según variables de la vivienda social en la ciudad de Pereira.

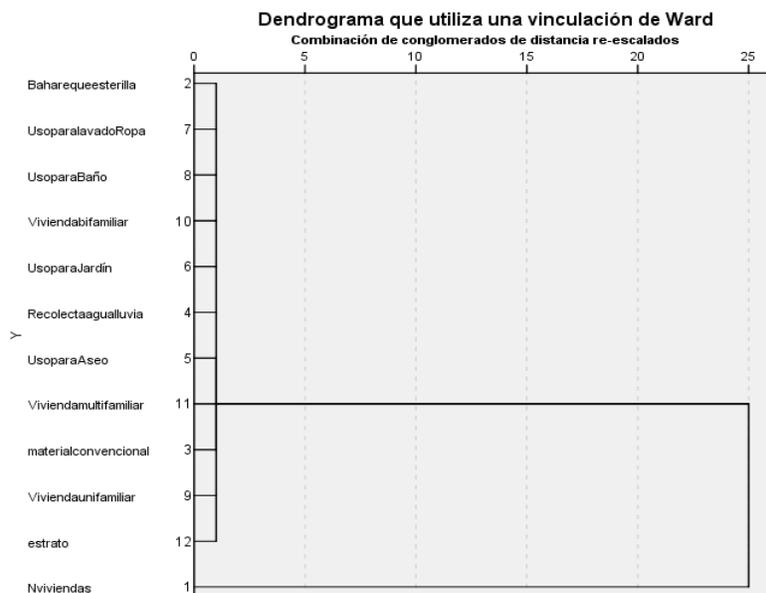


Figura 9. Dendrograma combinación de conglomerados a partir de variables de la vivienda social en la ciudad de Pereira (sin estandarización de variables).

Como resultado de estos análisis, se establecen tres conglomerados o clúster para la agrupación de barrios de vivienda social en la ciudad de Pereira, los cuales representan

según las características homogéneas identificadas para cada clúster un tamaño diferente en término del número de viviendas, pero que puede ser planteado en cada caso como una tipología barrial para la ciudad según las variables que le definen. La Figura 10 presenta los 3 clúster en que se agrupan los barrios analizados.

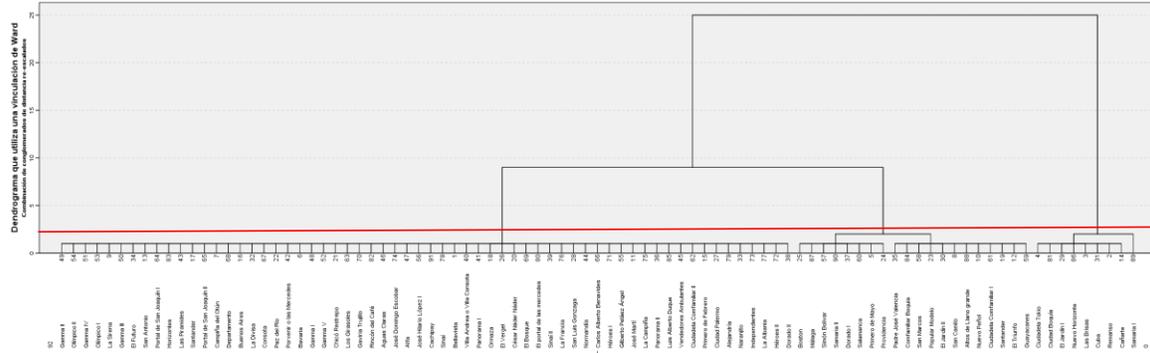


Figura 10. Dendrograma conglomerados barriales de vivienda social en la ciudad de Pereira.

Estos tres clústeres configuran tres tamaños promedio de barrio para una ciudad intermedia como Pereira, siendo el clúster 1 conformado por 62 barrios y un número promedio de 131.7 viviendas, el numero 2 por 9 barrios y un promedio de 1137 viviendas, y el numero 3 por 20 barrios y un promedio de 512.1 viviendas; en la siguiente tabla se presentan los datos promedio, máximo y mínimo de cada clúster barrial, así como su relación con las variables analizadas (ver Tabla 13).

Estos números de viviendas representan la escala o tamaño barrial que será utilizada para la proyección del impacto ambiental de un barrio de vivienda social en la ciudad de Pereira. El tamaño del clúster número 2, relacionado con la variable “Vivienda construida con Bahareque – esterilla” responde a las características y patrones constructivos culturalmente utilizados en el eje cafetero, donde la guadua ha sido un material tradicional en la construcción de la vivienda social (Muñoz, R. Jose F. 2010).

Ward Method		Número de viviendas	Vivienda construida con Bahareque - esterilla.	Vivienda que recolecta agua lluvia	Uso agua lluvia para Aseo	Uso agua lluvia para Jardín	Uso agua lluvia para lavado Ropa	Uso agua lluvia para Baño	Vivienda construida con material convencional
1	N	62	62	62	62	62	62	62	62
	Media	131,69	2%	20%	10%	5%	1%	2%	98%
	Mínimo	26	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%
	Máximo	282	50%	100%	100%	100%	33%	50%	100%
2	N	9	9	9	9	9	9	9	9
	Media	1137,00	0%	21%	12%	2%	3%	5%	100%
	Mínimo	875	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
	Máximo	1637	0%	39%	25%	11%	17%	17%	100%
3	N	20	20	20	20	20	20	20	20
	Media	512,15	1%	16%	9%	3%	1%	4%	99%
	Mínimo	327	0%	0%	0%	0%	0%	0%	82%
	Máximo	815	18%	45%	40%	20%	14%	33%	100%
Total	N	91	91	91	91	91	91	91	91
	Media	314,74	2%	19%	10%	4%	1%	3%	98%
	Mínimo	26	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%
	Máximo	1637	50%	100%	100%	100%	33%	50%	100%

Tabla 13. Tamaño promedio de los conglomerados barriales según el número de viviendas.

Un análisis de correlación entre las variables abordadas para la vivienda social a escala barrial, muestra la relación existente entre las variables seleccionadas, existiendo correlación entre las variables relacionadas con el aprovechamiento y uso de agua lluvia y que se presentan en el primer y tercer conglomerado; demostrando la asociación o interdependencia entre la recolección de agua lluvia en una vivienda y un uso tendencial para el para aseo y para el mantenimiento de Jardines. (Tabla 14)

Rho de Spearman		Número de viviendas	Vivienda construida con Bahareque - esterilla	Vivienda construida con material convencional	Vivienda que recolecta agua lluvia	Uso agua lluvia para Aseo	Uso agua lluvia para Jardín	Uso agua lluvia para lavado Ropa	Uso agua lluvia para Baño
Número de viviendas	Coefficiente de correlación	1,000	,125	-,125	,279 ^{**}	,317 ^{**}	,186	,297 ^{**}	,388 ^{**}
	Sig. (bilateral)		,236	,236	,007	,002	,078	,004	,000
	N	91	91	91	91	91	91	91	91
Vivienda construida con Bahareque - esterilla.	Coefficiente de correlación	,125	1,000	-,1,000 ^{**}	-,059	-,090	,042	-,064	,038
	Sig. (bilateral)	,236			,582	,397	,690	,547	,723
	N	91	91	91	91	91	91	91	91
Vivienda construida con material convencional	Coefficiente de correlación	-,125	-,1,000 ^{**}	1,000	,059	,090	-,042	,064	-,038
	Sig. (bilateral)	,236			,582	,397	,690	,547	,723
	N	91	91	91	91	91	91	91	91
Vivienda que recolecta agua lluvia	Coefficiente de correlación	,279 ^{**}	-,059	,059	1,000	,696 ^{**}	,426 ^{**}	,194	,322 ^{**}
	Sig. (bilateral)	,007	,582	,582		,000	,000	,065	,002
	N	91	91	91	91	91	91	91	91
Uso agua lluvia para Aseo	Coefficiente de correlación	,317 ^{**}	-,090	,090	,696 ^{**}	1,000	,190	,250 ^{**}	,302 ^{**}
	Sig. (bilateral)	,002	,397	,397	,000		,072	,017	,004
	N	91	91	91	91	91	91	91	91
Uso agua lluvia para Jardín	Coefficiente de correlación	,186	,042	-,042	,426 ^{**}	,190	1,000	,036	,244 ^{**}
	Sig. (bilateral)	,078	,690	,690	,000	,072		,737	,020
	N	91	91	91	91	91	91	91	91
Uso agua lluvia para lavado Ropa	Coefficiente de correlación	,297 ^{**}	-,064	,064	,194	,250 ^{**}	,036	1,000	,143
	Sig. (bilateral)	,004	,547	,547	,065	,017	,737		,176
	N	91	91	91	91	91	91	91	91
Uso agua lluvia para Baño	Coefficiente de correlación	,388 ^{**}	,038	-,038	,322 ^{**}	,302 ^{**}	,244 ^{**}	,143	1,000
	Sig. (bilateral)	,000	,723	,723	,002	,004	,020	,176	
	N	91	91	91	91	91	91	91	91

Tabla 14. Correlación de las variables analizadas en la vivienda social a escala barrial.

Para el caso del conglomerado 2, relacionado con la variable “número de viviendas,” el análisis demuestra una asociación con las variables “recolección de agua lluvia” y “uso para lavado de ropa” y “baños”.

Los materiales de construcción no presentaron asociación significativa con las variables de aprovechamiento y uso de agua lluvia; lo que indica que hasta el momento en que fueron tomados los datos por Orozco y Guzmán (2014), la incorporación de sistemas para el aprovechamiento de aguas lluvias y grises no han sido considerados en la construcción de la vivienda social independientemente del material con que esta sea desarrollada.

Estas variables homogéneas y sus conglomerados representan tres dimensiones o escalas barriales de interés y pertinencia para este estudio, configurando tres patrones barriales de diferente tamaño por su número medio de viviendas. Estos conglomerados permiten proyectar los impactos abordados en este documento a escala vivienda, hacia valores barriales que proporcionan una aproximación al impacto ambiental potencial del aprovechamiento de recursos hídricos no convenciones y el uso de materiales locales para la construcción, en función de las toneladas de CO₂ eq. que pueden implicar estas alternativas, en un ciclo de vida del sistema definido como de 50 años, considerando

sistemas independientes (por unidad de vivienda) para el aprovechamiento de agua de lluvia y agua gris.

6.3.2 Proyección del impacto ambiental potencial del aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales y el uso de materiales locales (guadua) en la construcción de nueva vivienda a escala barrial.

Tomando como unidades de análisis los clúster o conglomerados definidos anteriormente, y sus tamaños, se proyectaron los resultados obtenidos de escala vivienda a escala barrial, contando con tres aproximaciones acordes a las características de cada clúster.

Los resultados pretenden entonces, brindar una aproximación a la magnitud del impacto ambiental de los proyectos habitacionales a escala barrial. Es así como la implementación de un aprovechamiento de agua lluvia y de agua gris con sistemas individuales por vivienda, a escala barrial, y sin incorporar sistemas de bombeo para la distribución del agua, representa una reducción del **39,6%** en el potencial de calentamiento global para proyectos habitacionales donde la tipología predominante es la vivienda unifamiliar (ver Figura 11).

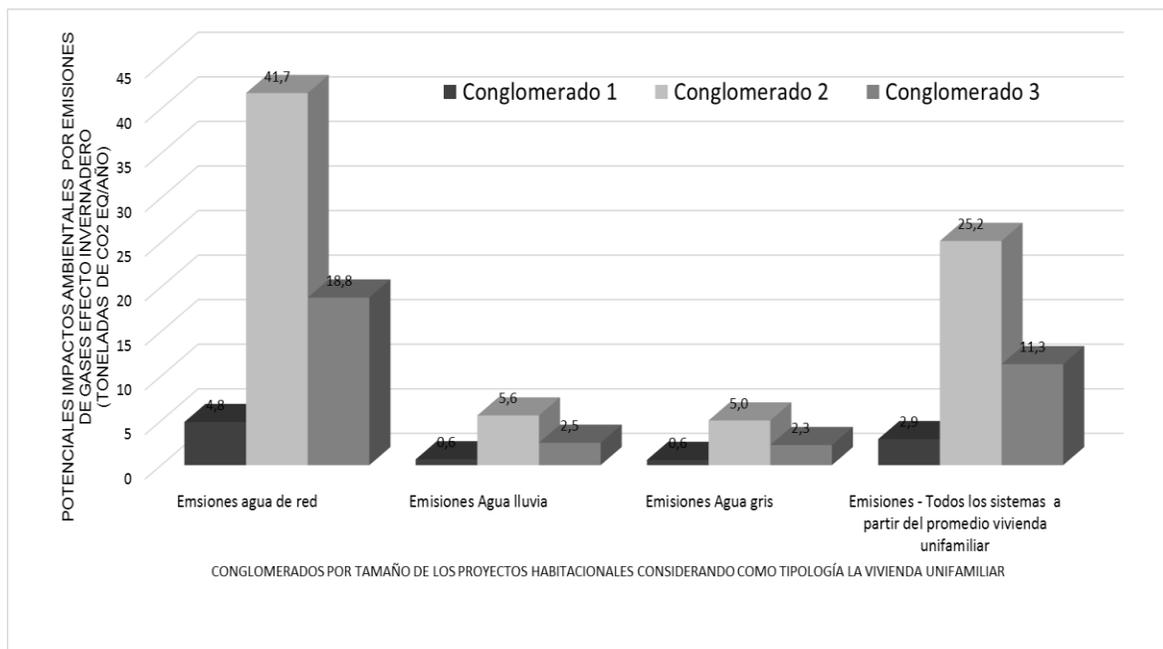


Figura 11. Potenciales impactos ambientales por emisión de gases efecto invernadero de los proyectos habitacionales a escala barrial constituidos por viviendas unifamiliares y considerando el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales.

Cabe mencionar que el tamaño de los proyectos habitacionales no afecta significativamente la proporción en la que se reduce el potencial impacto ambiental por

el uso de recursos hídricos no convencionales, si se asume que el aprovechamiento se realiza con sistemas individuales por vivienda, de baja escala y consumo de energía.

Este análisis, dado que se trata de una proyección escalada de los datos obtenidos por vivienda en este estudio, permite aproximar la magnitud del impacto a nivel urbano, donde por ejemplo el potencial de calentamiento global de un barrio como el conglomerado 2 (con una media de 1137 unidades habitacionales del tipo vivienda unifamiliar), si solo aprovecha el agua de red, representa 41,7 toneladas de CO₂ equivalentes en los 50 años del ciclo de vida de la vivienda.

Frente a un barrio constituido por viviendas con materiales convencionales y que usa solamente agua de red, al adicionar a este análisis el uso de materiales locales (Guadua) en la construcción de la vivienda social del tipo unifamiliar, combinado con el uso de los recursos hídricos no convencionales evaluados en este estudio, se encuentra una posible reducción a escala barrial del 18% en el potencial de calentamiento global generado, representando cerca de 10.161 toneladas de CO₂ eq./50 años, en un proyecto similar al del conglomerado 2 (en promedio 1137 unidades habitacionales), y de 4.575,7 toneladas de CO₂ eq./ 50 años, en un proyecto similar al del conglomerado 3 (en promedio 512 unidades habitacionales (ver Figura 12 y Figura 13).

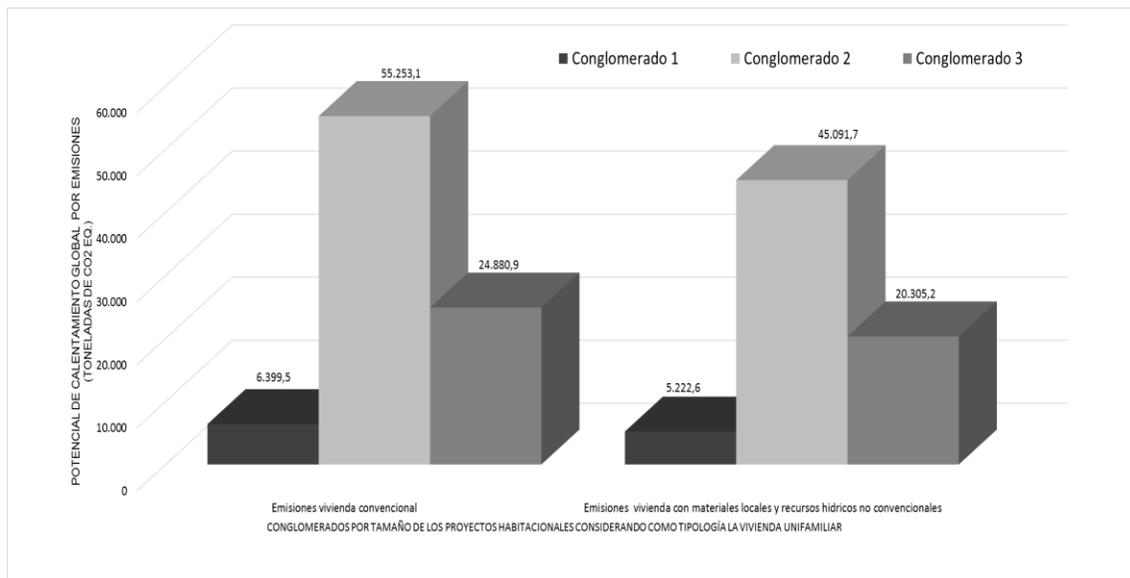


Figura 12. Potenciales impactos ambientales por emisión de gases efecto invernadero de los proyectos habitacionales a escala barrial constituidos por viviendas unifamiliares considerando el uso de materiales locales de construcción y el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales.

Por otro lado, si solo se considera el material de construcción en la vivienda unifamiliar, la utilización de materiales locales como la Guadua a escala barrial, representa una

reducción de hasta un 5.94% en el potencial de calentamiento global generado frente a un barrio constituido por viviendas construidas con materiales convencionales; reducción que aumentaría hasta un 6.6% si se utilizan recursos hídricos no convencionales (ver Figura 13).

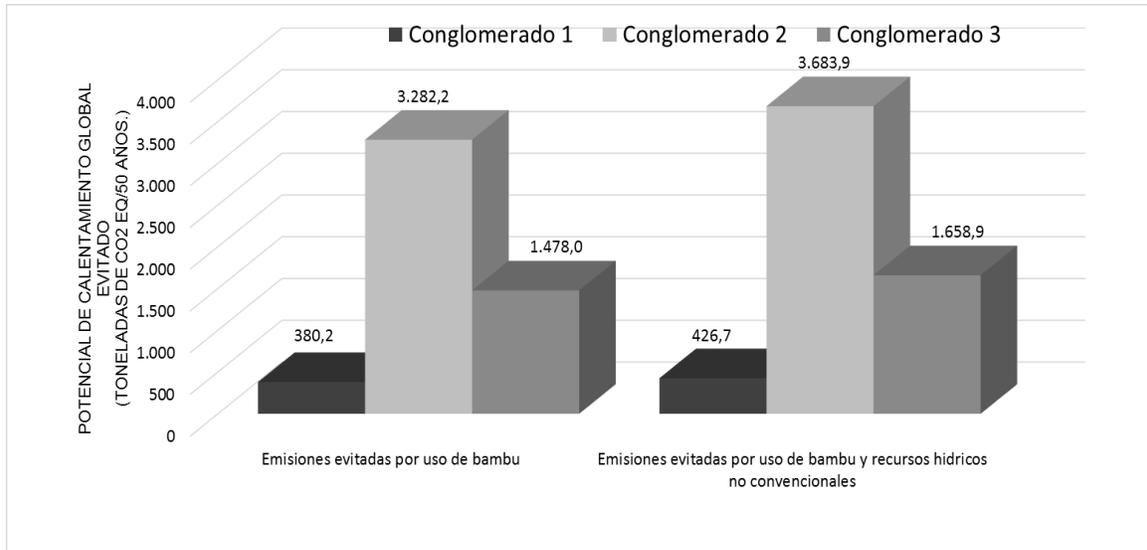


Figura 13. Potencial de calentamiento global evitado en los proyectos habitacionales a escala barrial constituidos por viviendas unifamiliares considerando el uso de materiales locales de construcción y el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales.

Lo anterior indica que la consideración del uso de recursos hídricos no convencionales en una vivienda que utiliza materiales locales en su proceso de construcción puede representar una estrategia significativa para la planificación urbana a partir del potencial evitado de calentamiento global, constituyendo estas dos alternativas elementos determinantes de una vivienda más sostenible a partir de los impactos ambientales aquí considerados (ver Figura 13).

7 CONCLUSIONES

□ Los impactos fueron menores para la vivienda más sostenible en casi todas las categorías evaluadas.

- El impacto ambiental por el uso de agua gris y agua de lluvia, comparado con el generado por el agua de red, es menor en 8 de los 9 impactos evaluados. El único impacto ambiental que presenta un aumento por el aprovechamiento de agua no convencional es el agotamiento de recursos abióticos.
- La fase final del ciclo de vida del sistema (deconstrucción), presente en todos los impactos evaluados un menor valor en la vivienda más sostenible, con respecto a la vivienda convencional, representando una reducción de en promedio **55%** de los impactos generados en esta fase del ciclo de vida de la vivienda.

□ El Potencial de Calentamiento Global o GWP presentó un menor impacto si se aprovecha agua gris y/o agua lluvia, frente a una vivienda que solo consume agua de red.

- El potencial de calentamiento global o GWP agua de red fue de **0,20 kg CO₂ eq/m³**
- El potencial de calentamiento global o GWP agua gris fue de **0,11 kg CO₂ eq/m³**.
- El potencial de calentamiento global o GWP agua lluvia fue de **0,12 kg CO₂ eq/m³**
- Al combinar los sistemas de agua de lluvia y aguas grises, sin incorporar sistemas de bombeo, se pueden lograr disminuciones de hasta **0,088 CO₂ eq. por cada m³** de agua utilizada en el sistema, lo que implica una reducción del **42 %** sobre el Potencial de calentamiento global o GWP generado por m³ de agua de red usada.
- Considerando el ciclo de vida del sistema, el impacto evitado por el uso de agua no convencional para el caso del GWP representa **353,8 kg de CO₂ eq (en 50 años)**, implicando una reducción del **18%** en el posible impacto ambiental.

- **La utilización de materiales locales como la guadua para la construcción de viviendas unifamiliares, y el aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales, representa un menor impacto ambiental en el ciclo de vida de la vivienda.**
 - Considerando solamente los materiales de construcción, el potencial de calentamiento global reemplazando algunos de estos materiales por Guadua, se reduce en **190,8 kg CO₂ eq. /m²**.
 - Considerando los materiales de construcción y el uso de agua no convencional, el impacto potencial ambiental de gases efecto de invernadero para una vivienda se reduce en **198,7 kg CO₂ eq. /m²**.
 - Estas reducciones equivalen a un 18 %

- **La estimación del potencial urbano en la reducción de los impactos identificados, a través de la evaluación a escala barrial para los tres conglomerados habitacionales considerados, proporciona una idea sobre la importancia de la implementación de las alternativas planteadas, su pertinencia como estrategias para la sostenibilidad urbana, y su rol en la adaptación y mitigación territorial al cambio climático, confirmando las hipótesis planteadas en este estudio.**
 - A escala barrial, la implementación de un aprovechamiento generalizado de agua lluvia y agua gris representa una reducción del **39%** en el potencial de calentamiento global para proyectos habitacionales donde la tipología predominante es la vivienda unifamiliar con consumo de agua de red sin bombeo.
 - La Guadua a escala barrial, representa una reducción de hasta un **5,9%** en el potencial de calentamiento global generado frente a un barrio de viviendas construidas con materiales convencionales.

8 RECOMENDACIONES

En el marco de una política de vivienda más sostenible para Colombia, y como posible estrategia de mitigación al cambio climático de interés nacional, la incorporación de las alternativas evaluadas, en los actuales modelos de desarrollo de la vivienda social en Colombia, bien sea al nivel de vivienda o a escala barrial, puede representar un impacto significativo en las emisiones de GEI del sector; y constituir un posible aporte a los compromisos asumidos en la COP21, relacionados con la reducción del 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero proyectadas para el año 2030, las cuales tienen pertinencia desde la estrategia sectorial que involucra la construcción sostenible y la utilización de materiales con menor huella de carbono, así como a la eficiencia energética e hídrica en ámbito residencial, para el ordenamiento ambiental territorial de la ciudad actual, sin embargo, es necesario complementar este estudio con la evaluación económica de las alternativas abordadas, de tal forma que sea posible establecer si estas se encuentran por debajo del umbral planteado para el escenario de mitigación de interés nacional, establecido en 30 dólares por tonelada de CO2 reducida.

Esta investigación identifico la necesidad de generar estudios específicos sobre la eficiencia energética en la producción y distribución de agua de red, que permita delimitar con mayor precisión los ACV, dado que solo se dispone de datos de otros países con un mix de consumo energético bastante variable.

La implementación de las estrategias evaluadas demanda el desarrollo tecnológico de los sistemas de aprovechamiento de aguas grises y lluvias, y la definición de estándares para su construcción – adecuación y mantenimiento en la vivienda social. De igual forma, y aunque existen actualmente importantes desarrollos en el ámbito constructivo relacionados con el uso de la Guadua, es importante incentivar su implementación a escala barrial, y su re-conocimiento y reivindicación social como material de construcción, si se pretende implementar las estrategias abordadas en este estudio.

En el marco de esta investigación, y con el apoyo del Grupo de Investigación en Gestión Ambiental Territorial GAT, bajo el liderazgo de Tito Morales Pinzon, se han incorporado parte de los resultados obtenidos en el desarrollo de un Software para la modelación del aprovechamiento de agua no convencional. El software denominado “PRECIPITAGAT”, que cuenta con certificado de registro de soporte lógico – software ante el Ministerio del Interior y la Dirección Nacional de Derecho de Autor; ha sido desarrollado para facilitar la modelación de la precipitación a partir de patrones conocidos, y contribuir en el dimensionamiento de sistemas de aprovechamiento de agua no convencional, presentando indicadores de eficiencia e incorporando estimaciones a partir de modelos desarrollados anteriormente sobre potenciales emisiones de gases de efecto invernadero considerando el ciclo de vida de estos sistemas. Se recomienda entonces su utilización en el marco de futuras investigaciones.

Se recomienda de igual forma la utilización de un libro y un artículo que serán publicados en el segundo semestre del 2016 y los resultados que hacen parte de una ponencia realizada en la VI conferencia internacional de ciclo de vida en Latino América, CILCA -2015, los cuales se nutren de los procesos, enfoques y resultados obtenidos a lo largo del proceso investigativo al que aporta este trabajo.

9 BIBLIOGRAFÍA

1. Abdulla, F.A. and Al-Shareef, A. (2006). Assessment of Rainwater Roof Harvesting Systems for Household Water Supply in Jordan. NATO Security through Science Series, Integr. Urban Water Resour. Manag., 10, 291–300. doi:10.1007/1-4020-4685-5_30.
2. Abdulla, F.A. and Al-Shareef, A. (2009). Roof Rainwater Harvesting Systems for Household Water Supply in Jordan. Desalination, 243 (1–3), 195–207.
3. Angrill, S., Morales, T., Cerón, I., Gabarrell, X., Josa, A., & Rieradevall, J. (2011). Environmental impact of rainwater harvesting integration in new construction compared with renovated buildings. Application to urban planning for emerging neighbourhoods in Bogotá. Proceedings, CILCA, 54-58.
4. Ballén, J., Galarza, M., & Ortiz, R. (2006). Sistemas de aprovechamiento de agua lluvia para vivienda urbana. Int. Symp. on VI SEREA, Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa, Brazil.
5. Bermejo, R., Arto, I., Hoyos, D. & Garmendia, E. (2010). Menos, es más. Del desarrollo sostenible al decrecimiento sostenible. Cuadernos de Trabajo de Hegoa, Número 52.
6. Camargo, J.C, Morales Tito; García, J.H. (2007). Medura e Inventario Forestal para la Planificación y Manejo Sostenible de Bosques de Guadua. COLCIENCIAS, Universidad Tecnológica de Pereira.
7. Colorado, Alexandra. (2010). La Guadua una maravilla natural de grandes bondades y promisorio futuro. Recuperado en Internet: <http://www.revista-mm.com/rev34/quadua.htm>
8. Cheng, C.L., Liao, M.C. and Lee, M.C. (2006). A quantitative evaluation method for rainwater use guideline. Building Services Engineering Research & Technology, 27 (3), 209–218. Retrieved 2 December 2009 from ABI/INFORM Global. (Document ID: 1091260741).
9. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). (2002). Disaster Risk Management. Working Concept.
10. Domènech, L., & Saurí, D. (2011). A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multifamily buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): social experience, drinking water savings and economic costs. Journal of Cleaner Production, 19(6-7), 598-608.
11. Edwin Zea Escamilla, G. Habert. (2014). Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity. Journal of Cleaner Production 69 (2014) 117e127
12. Escamilla, E., Habert, G. (2014). Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity. Journal of Cleaner Production 69 (2014) 117e127

13. ESMAP (2012). Introducción a la Eficiencia Energética en Empresas Municipales de Agua y Saneamiento Urbano. Banco Internacional para la Reconstrucción y Desarrollo / GRUPO BANCO MUNDIAL.
14. Farreny, R, Morales-Pinzón, T., Guisasola, A., Tayá, C., Rieradevall, J., Gabarrell X. (2011). Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water Research* 45 (2011) 3245-3254.
15. Ferro, G. Lentini, E. (2015). Eficiencia energética y regulación económica en los servicios de agua potable y alcantarillado. CEPAL/GIZ
16. García Arbeláez, C.; Barrera, X.; Gómez, R. y R. Suárez Castaño. (2015). El ABC de los compromisos de Colombia para la COP21. 2 ed. WWF-Colombia. 31 pp
17. Gallopin, G. (2003). Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico. Serie Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Santiago de Chile. Naciones Unidas.
18. Ghisi, E. (2006) Potential for Potable Water Savings by Using Rainwater in the Residential Sector of Brazil. *Build. Environ.*,41 (11), 1544–1550.
19. Ghisi, E. (2010). Parameters Influencing the Sizing of Rainwater Tanks. *Water Resour Manage*, 24, 2381–2403.
20. Ghisi, E., Lapolli, D. and Martini, M. (2007) Rainwater Tank Capacity and Potential for Potable Water Savings by Using Rainwater in the Residential Sector of Southeastern Brazil. *Build. Environ.*, 42 (4), 1654–1666.
21. Guinée, J. (ed.), Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., et al. (2001). Life cycle assessment: an operational guide to the ISO standards. Parts 1 and 2.
22. Gonzalez F. (2007). Aportes para una Caracterización de las Ciencias Ambientales. En: SÁENZ Orlando (ed) *Las Ciencias Ambientales: una Nueva Área de Conocimiento*. Red Colombiana de Formación Ambiental, RCFA.
23. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. (2009). UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. ISBN: 978-92-807-3021-0
24. JESSICA-ALMAZÁN LOPE. (2014). Análisis de la Mejora de la Eficiencia Energética de los Procesos de una EDAR. Universidad Politecnica de Valencia. España
25. ISO 14040. (2006). Environmental management —life cycle assessment— principles and framework. International Standard 14040. International Organisation for Standardisation, Geneva.
26. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MVDS. (2015). Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional iNDC ante COP 21 de la CMNUCC.

27. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MVDS. (2012). Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana. Unión Temporal Construcción Sostenible S.A y Fundación FIDHAP (Consultor). Bogotá, D.C.: Colombia.
28. Morales-Pinzón, T; Rieradevall, J; M. Gasol, C.M., Gabarrell, X. (2012a). Plugrisost v1.0. Modelo dinámica de flujos de agua para uso doméstico, con énfasis en aprovechamiento de fuentes no convencionales (pluviales, grises). Grupo de Investigación en Sostenibilidad y Prevención Ambiental (Sostenipra), Universidad Autónoma de Barcelona (España) y Grupo de Investigación Gestión Ambiental Territorial (GAT), Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia). Available (Spanish version) in <http://sostenipra.ecotech.cat/login.php?referrer=plugrisost>
29. Morales-Pinzón, T., Rieradevall, J., Gasol, C. M., Gabarrell, X. (2012b). Potential of rainwater resources based on urban and social aspects in Colombia. *Water and Environment Journal*, 26(4), 550–559. doi:10.1111/j.1747- 6593.2012.00316.x
30. Morales-Pinzon. Xavier Gabarrell, Joan Rieradevall, Maria Rosa Rovira, Gara Villalba, Alejandro Josa, Carles M. Gasol, A C Dias, Dx Martinez Aceves. (2014a). "Plugrisost: a model for design, economic cost and environmental analysis of rainwater harvesting in urban systems". En: *Inglaterra Water Practice and Technology* ISSN: 1751-231X ed: v.9 fasc.2 p.243 - 255
31. Morales-Pinzón, T., Lurueña, R., Gabarrell, X., Gasol, C. M., Rieradevall, J. (2014b). Financial and environmental modelling of water hardness—Implications for utilising harvested rainwater in washing machines. *Science of the Total Environment* 470–471 (2014) 1257–1271
32. Morales-Pinzón, T., Guzmán, S., Orozco, I. (2014c). Evaluation of sustainability aspects and the use of local materials in the housing construction in Colombia. *World Sustainable Building (WSB2014)*, Barcelona, October 28-30.
33. Morales-Pinzón, T., Rieradevall, J., Gasol, C. M., & Gabarrell, X. (2015). Modelling for economic cost and environmental analysis of rainwater harvesting systems. *Journal of Cleaner Production*, 87, 613–626. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.021>
34. Millennium Ecosystem Assessment -MEA. (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press, Washington. 155pp, here: p.40.
35. Muñoz, R. Jose F. (2010). Tipificación de los Sistemas Constructivos Patrimoniales de Bahareque en el Paisaje Cultural Cafetero de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
36. Naciones Unidas. (2007). *El Agua, Una Responsabilidad Compartida*. 2º Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo.

37. Naciones Unidas. (2011). Ecoeficiencia y desarrollo de infraestructura urbana sostenible en Asia y América Latina. Medidas para el desarrollo de infraestructura urbana basada en los principios de la ecoeficiencia en la Ciudad Región del Caribe, Cartagena, Barranquilla, Santa Marta de Colombia. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
38. Naciones Unidas. (1987). Our Common Future: Brundtland Report – UN
39. Naredo, J. (2004). Sobre el origen, el uso y el contenido del término sostenible. Cuadernos de investigación urbanística, Nº. 41, p. 7-18. Universidad politécnica de Madrid.
40. Newman, Peter W.G. (2009). Sustainability and cities: extending the metabolism model. *Landscape and Urban Planning* 44 (1999) 219-226
41. Leff, E. (2010). Globalización, ambiente y sustentabilidad. Saber Ambiental, 6a edición. México: Siglo XXI Editores.
42. ONU-Hábitat, (2012). Estado de las Ciudades de América Latina y el Caribe 2012. Rumbo a una nueva transición urbana. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos.
43. Orozco, I. E., Guzmán, S. (2014). Análisis estratégico para la planificación de planes de vivienda social bajo criterios de sostenibilidad. Caso de estudio Pereira. Informe de investigación. COLCIENCIAS – UTP.
44. Ortiz-Rodríguez, O., Castells, F., Sonnemann, G., (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*. Vol. 408, No 12. 2010. 2435-2443.
45. Ossa, C. A. (2004). Teoría General de Sistemas. Fundamentos. Universidad Tecnológica de Pereira. ISBN: 33 – 6163 - 1
46. Pengue, Walter A. (2009). Fundamentos de Economía Ecológica, Bases teóricas e instrumentos para la resolución de los conflictos sociedad naturaleza. Editorial Kaicron, Buenos Aires.
47. PEÑA, D. (2002): Análisis de Datos Multivariantes. Editorial Mc Grawhill
48. PNUMA. (2008). Consumo y Producción Sustentable en América Latina y el Caribe.
49. PNUMA/IMA. (1999). Producción más Limpia. Programa de las naciones unidad para el medio ambiente, industria y medio ambiente.
50. Ratnayaka, D., Brandt, M., & Johnson, K. (2009). CHAPTER 1 - The Demand for Public
51. Varón, M. (2015). Agua para uso doméstico en la ciudad de Pereira: Análisis de Ciclo de Vida y escenarios de manejo ambiental. Universidad Tecnológica de Pereira.

52. Water Supplies. En D. Ratnayaka, M. Brandt, & K. Johnson, *Twort's Water Supply* (Sixth Edition ed., págs. 1-35). Boston: Butterworth-Heinemann.
53. Roebuck, R., Oltean-Dumbrava, C., Tait, S. (2011). Whole life cost performance of domestic RWH systems in the United Kingdom. *Water and Environment Journal*, 25, 355-365.
54. Sanes, Aida. (2012). *El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en el Desarrollo Sostenible: Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Sostenibilidad de Sistemas Productivos*. Universidad Nacional de Colombia.
55. Tarchópulos, S. D., Ceballos R. O. (2000). *Calidad de las soluciones de vivienda dirigida a los sectores de bajos ingresos en Bogotá*. Pontificia Universidad Javeriana, Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología (Colciencias) y Banco Interamericano de Desarrollo (BID)
56. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2014). *Sistema de Información Eléctrico Colombiano*. Available in <http://www.siel.gov.co/>
57. Universidad Tecnológica de Pereira. (2014). *Red Hidroclimatológica del Departamento de Risaralda*. Consultado en marzo de 2014 a través de <http://www.utp.edu.co/hidroclimatologica/es/inicio>.
58. Universidad de Deusto. (2012). *Metodología para el Análisis de Ciclo de Vida de una Depuradora de Aguas Residuales*. BizKaia.
59. Venkatesh, G. Brattebo, H. (2011). Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services: Case study of Oslo (Norway). *Energy*. Volume 36, Issue 2, Pages 792-800
60. Villarreal, E.L. and Dixon, A. (2005) *Analysis of a Rainwater Collection System for Domestic Water Supply in Ringdansen, Norrkoping, Sweden*. *Build. Environ.*, 40 (9), 1174–1184.
61. World Water Assessment Programme. (2012). *The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk*. Paris: UNESCO.