

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DEL SUMINISTRO DE AGUA  
POTABLE PARA EL MUNICIPIO DE “EL CARMEN DE BOLÍVAR”**

**LISBI BIBIANA AFANADOR SILVA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍASFISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAQUÍMICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2015**

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DEL SUMINISTRO DE AGUA  
POTABLE PARA EL MUNICIPIO DE “EL CARMEN DE BOLÍVAR”**

**LISBI BIBIANA AFANADOR SILVA**

**Trabajo de aplicación para optar el título de  
Magister en Ingeniería Ambiental**

**Director**

**PhD. HUMBERTO ESCALANTEHERNÁNDEZ  
Ing. Químico Ph.D.**

**Codirector**

**PhD. PAOLA ANDREA ACEVEDO PABÓN  
Ing. Químico Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍASFISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAQUÍMICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2015**

*A Dios por cada bendición recibida, a mi familia por su incondicional apoyo, a mi madre por la confianza puesta en mí y a mi hija por su infinito amor y comprensión.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la empresa ACUECAR S.A. E.S.P. por permitir la ejecución de este proyecto, al Ing. Jesús Angulo Cardona (Agente Especial de ACUECAR S.A. E.S.P), por disponer de los recursos humanos y tecnológicos para su desarrollo.

Al Dr. Nadin Farak Romero, por la confianza, consejos y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo.

Al Ing. Javier Eduardo Bohórquez, Jefe de Captación y Pozos de ACUECAR S.A. E.S.P. por su apoyo, disposición y orientación en la ejecución de este estudio.

A todos los profesionales que conforman las distintas áreas de ACUECAR S.A. E.S.P. por compartir su conocimiento y experiencia en cada uno de los procesos y levantamiento de datos.

Al Ing. Omar Alberto Ávila Rojas, compañero de maestría por su colaboración, tiempo y dedicación.

A los profesores Humberto Escalante y la profesora Paola Acevedo Pabón, director y codirector del proyecto por su confianza, colaboración, asesoría y aportes para la realización de esta tesis.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>16</b>
<b>1. MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>22</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	22
1.2. OBJETIVOS.....	24
1.2.1. Objetivo General .....	24
1.2.2. Objetivos Específicos .....	25
<b>2. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>26</b>
2.1. PROCESO DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN EL MUNICIPIO EL CARMEN DE BOLÍVAR.....	<b>26</b>
2.1.1. Generalidades del municipio del Carmen de Bolívar .....	26
2.1.2. Suministro De Agua Potable .....	27
2.1.2.1. Subproceso 1: Captación de agua subterránea.....	28
2.1.2.2. Campo De Pozos .....	31
2.1.2.3. Subproceso 2: Conducción de agua cruda.....	34
2.1.2.4. Subproceso 3: Tratamiento de agua potable.....	35
2.1.2.5. Subproceso 4: Distribución de agua potable .....	38
2.2. IMPACTO AMBIENTAL.....	41
2.2.1. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA .....	43
2.2.1.1. Fases del ACV .....	48
2.2.1.2. Categorías de impacto.....	49
2.2.1.3. SimaPro .....	51
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>55</b>
3.1. ETAPA I: APROPIACIÓN TEÓRICA DE LOS PROCESOS .....	57
3.2. ETAPA II: CONSTRUCCIÓN DIAGRAMA DEL PROCESO .....	58
3.3. ETAPA III: IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO Y CONTROL DE CALIDAD .....	59
3.4. ETAPA IV: APLICACIÓN NTC ISO 14040. ....	60
3.4.1. Definición del objetivo .....	60

3.4.2. Alcance del estudio .....	60
3.4.3. Función del sistema bajo estudio .....	60
3.4.4. Unidad funcional .....	61
3.4.5. Límites del sistema .....	61
3.4.6. Límites temporales.....	61
3.4.7. Etapas excluidas del análisis.....	61
3.5. ETAPA V: ELABORACIÓN DEL INVENTARIO AMBIENTAL.....	63
3.6. ETAPA VI: SELECCIÓN DE CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL.....	63
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>66</b>
4.1. BALANCE DE MASA .....	66
4.2. BALANCE DE ENERGÍA.....	68
4.3. CASO DE ESTUDIO 1 .....	72
4.4. CASO DE ESTUDIO 2 .....	75
4.5. CASO DE ESTUDIO 3 .....	79
4.6. PERFIL MEDIOAMBIENTAL DEL PROCESO DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN EL MUNICIPIO DE EL CARMEN DE BOLÍVAR. ....	85
4.7. CASO DE ESTUDIO 4 .....	92
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>94</b>
<b>6. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>96</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>98</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Niveles de Operación campo de pozos.....	30
Tabla 2. Caudal (l/s) concesionado y explotado.....	31
Tabla 3. Característica de diseño de pozos Ovejas. ....	32
Tabla 4. Característica de diseño de pozos El Piñal. ....	33
Tabla 5. Características de la línea de aducción.....	33
Tabla 6. Características de la línea de conducción. ....	35
Tabla 7. Sectorización red de distribución El Carmen de Bolívar. Fuente: Autor.....	39
Tabla 8. Tipo de vehículos para transporte de agua en bloque.....	40
Tabla 9. Tubería de presión PAVCO instalada en redes de distribución. ....	41
Tabla 10. Método de evaluación seleccionado para el ACV.....	51
Tabla 11. Programas informáticos para estudios de ACV. ....	52
Tabla 12. Base de datos SIMAPRO.....	54
Tabla 13. Escenarios de trabajo para el ACV, (a) escenario actual, (b) escenario futuro. 56	
Tabla 14. Identificación de tipo de corriente.....	58
Tabla 15. Puntos de muestreo de agua (a) tratada, (b) cruda. ....	59
Tabla 16. Categorías de impacto ambiental de sistemas de agua potable.....	65
Tabla 17. Balance de masa para el proceso de rebombado. ....	66
Tabla 18. Inventario de corrientes de entradas y salidas de masa para el proceso de tratamiento. Fuente: Autor .....	67
Tabla 19. Balance de masa global para el sistema de distribución de agua potable. ....	68
Tabla 20. Equipos eléctricos asociados al proceso de distribución de agua potable,(a) escenario actual y (b) escenario futuro. ....	69
Tabla 21. Balance de energía para el sistema de distribución de agua potable. ....	69
Tabla 22. Inventario de tubería para el sistema de distribución de agua. ....	70
Tabla 23. Casos para ACV en red de distribución de agua potable .....	72
Tabla 24. Cargas ambientales del proceso general de distribución de agua potable caso de estudio 3.....	80

Tabla 25. Factor de caracterización para calentamiento global.....	116
Tabla 26. Factores de caracterización toxicidad humana.....	117
Tabla 27. Categorías de impacto más utilizadas para estudios de ACV.....	118
Tabla 28. Categorías de impacto aceptadas por ISO para cuatro métodos de evaluación de impactos de SimaPro.....	119
Tabla 29. Caracterización de agua potable.....	120
Tabla 30. Consumos de energía eléctrica y materias primas para tubería en PVC.....	121
Tabla 31. Consumos de energía eléctrica y materias primas para tubería en HD.....	121
Tabla 32. Consumos de energía eléctrica para tubería en PVC Orientado.....	121
Tabla 33. Emisiones generadas al aire para tubería en PVC Orientado.....	122
Tabla 34. Emisiones generadas al aire para tubería en PVC.....	122
Tabla 35. Emisiones generadas al aire para tubería en HD.....	122
Tabla 36. ICV Caracterización de impactos ambientales globales caso de estudio 1.....	123
Tabla 37. ICV Análisis de contribución caso de estudio 1.....	123
Tabla 38. Inventario global para el caso de estudio 2.....	126
Tabla 39. ICV caracterización de impactos ambientales globales caso de estudio 2.....	126
Tabla 40. ICV Análisis de contribución caso de estudio 2.....	127
Tabla 41. Inventario global para el caso de estudio 3.....	128
Tabla 42. ICV Caracterización de impactos ambientales globales caso de estudio 3.....	128
Tabla 43. ICV Análisis de contribución caso de estudio 3.....	128
Tabla 44. ICV Caracterización de impactos ambientales globales escenario 2, caso de estudio 3.....	129
Tabla 45. ICV Análisis de contribución escenario 2, caso de estudio 3.....	129
Tabla 46. ICV Calentamiento global.....	130
Tabla 47. ICV Formación de ozono por vegetación.....	130
Tabla 48. ICV Formación de ozono por actividades humanas.....	130
Tabla 49. ICV Eutrofización terrestre.....	130
Tabla 50. ICV Acidificación.....	131
Tabla 51. ICV eutrofización acuática (N).....	131
Tabla 52. ICV Toxicidad humana en aire.....	131
Tabla 53. ICV Toxicidad humana en suelo.....	132

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema de distribución de agua: municipio El Carmen de Bolívar.....	28
Figura 2. Campo de Pozos. Pozo No. 13.....	29
Figura 3.(a)Tanques de recepción estación de rebombeo. (b) Equipos de impulsión estación de rebombeo. ....	36
Figura 4. Mapa sectorización de El Carmen de Bolívar.....	39
Figura 5. Las fases de un ACV de acuerdo a ISO 14040.....	49
Figura 6. Etapas metodológicas aplicadas en el ACV.....	55
Figura 7. Subprocesos para la distribución de agua en el Municipio de El Carmen de Bolívar. ....	57
Figura 8.Balance de materia y energía. ....	58
Figura 9. Árbol de proceso para la distribución de agua realizada por Acuecar S.A. con corte de visualización al 0.037% para el caso 1 escenario 1.....	73
Figura 10.Caracterización de impactos ambientales globales Caso de estudio 1. ....	74
Figura 11. Árbol de proceso para la distribución de agua realizada por Acuecar S.A. con corte de visualización al 0.037% para el caso 2 escenario 1.....	76
Figura 12.Caracterización de impactos ambientales globales Caso de estudio 2. ....	78
Figura 13. Análisis de contribución caso de estudio 2.....	79
Figura 14. Árbol de proceso para la distribución de agua realizada por Acuecar S.A. con corte de visualización al 0.037% para el caso 3 escenario 1.....	81
Figura 15. Caracterización de impactos ambientales globales Caso de estudio 3. ....	82
Figura 16. Análisis de contribución caso de estudio 3.....	83
Figura 17. Perfil medioambiental para el proceso de distribución de agua potable escenario 2 caso de estudio 3. ....	84
Figura 18. Perfil medioambiental para el calentamiento global escenario 2-3.....	86
Figura 19. Perfil medioambiental para formación de ozono por vegetación escenario 2-387	

Figura 20. Perfil medioambiental para formación de ozono por actividades humanas escenario 2-3.....	87
Figura 21. Perfil medioambiental para la eutrofización terrestre escenario 2-3 .....	88
Figura 22. Perfil medioambiental para la acidificación escenario 2-3 .....	89
Figura 23. Perfil medioambiental para la eutrofización acuática (N).....	90
Figura 24. Perfil medioambiental para la toxicidad humana en aire .....	90
Figura 25. Perfil medioambiental para la toxicidad humana en suelo.....	91
Figura 26. Contribución de Procesos (mPt) escenario 2-3 .....	92
Figura 27. Análisis de Contribución, caso de estudio 4. ....	93
Figura 28. Análisis de caracterización, caso de estudio 4. ....	93
Figura 29. Análisis de contribución caso de estudio 1.....	124

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Metodologías de Análisis de Impacto Ambiental.....	105
Anexo B. Fases del Análisis de Ciclo de Vida.....	109
Anexo C. Categorías De Impacto Ambiental.....	116
Anexo D. Caracterización de Aguas .....	120
Anexo E. Corrientes Generadas Para La Producción De 1 Metro De Tubería En PVC Y HD .....	121
Anexo F. Inventario De Ciclo De Vida.....	123

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DEL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE PARA EL MUNICIPIO DE EL “CARMEN DE BOLÍVAR”\*

**AUTOR:** Lisbi Bibiana Afanador\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Análisis de ciclo de vida, agua potable, impacto ambiental, SIMAPRO, categorías de impacto.

## **RESUMEN**

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta para la cuantificación de impactos ambientales potenciales globales asociados a los procesos de obtención de bienes, productos y servicios. El presente estudio consistió en la elaboración de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con el fin de identificar y cuantificar los impactos ambientales potenciales asociados a los procesos de captación, conducción, potabilización y distribución de agua, por parte de la empresa de servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado de El Carmen de Bolívar (ACUECAR S.A. E.S.P.), ubicada en el departamento de Bolívar, Municipio Carmen de Bolívar. La fuente de abastecimiento son aguas subterráneas pertenecientes al acuífero de Morroa, ubicado en el Municipio de Sucre. Para llevar a cabo el análisis de ciclo de vida se empleó el método de análisis EDIP 2003, relacionada en el software SIMAPRO. Las categorías de impacto que se evaluaron fueron: Calentamiento global, Toxicidad humana en suelo, toxicidad humana en aire, formación de ozono por vegetación, formación de ozono por actividades humanas, acidificación, eutrofización acuática (N), y eutrofización terrestre.

Los resultados obtenidos permitieron establecer que el 89.4% de la carga ambiental total estaba asociada al proceso de distribución de agua en carro tanques. Al analizar el proceso para un sistema de distribución de agua por redes hidráulicas se logró determinar que el 76.6% de la carga ambiental está definido por el uso de energía eléctrica en los procesos de captación, conducción y tratamiento. En cuanto a las categorías de impacto ambiental se ven afectadas por todas las etapas que componen el sistema, debido a que está asociado al consumo de energía eléctrica en cada una de ellas.

---

\*Trabajo de aplicación para optar el título de Magíster en Ingeniería Ambiental

\*\*Facultad de ingenierías fisicoquímicas UIS. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Ambiental. Director: PhD. Humberto Escalante Hernández, Codirector: PhD. Paola Andrea Acevedo Pabón.

**TITLE:** COMPARATIVE LIFE CICLE ASSESSMENT OF POTABLE WATER SUPPLY FOR  
“CARMEN DE BOLIVAR” TOWN\*

**AUTHOR:** Lisbi Bibiana Afanador\*\*

**KEYWORDS:** Life Cycle Assessment, potable water, environmental impact, SIMAPRO, categories of impact.

### **ABSTRACT**

Life Cycle Assessment (LCA) is a tool to quantify the potential global environmental impacts associated to goods, products and services obtaining processes. The current study consisted of making a life cycle assessment (LCA), in order to identify and quantify the potential environmental impacts associated to the catchment, conducting and purification processes, also distribution of water done by the public services companies in the areas of aqueduct and sewage systems of “El Carmen de Bolivar (ACUECAR S.A. E.S) which is located in Bolivar department, Carmen De Bolivar town. Supply source is underground water coming from Morroa aquifer located in Sucre department. In order to carry out the life cycle assessment, the analysis method EDIP 2003 was used it is related in the SIMAPRO software. The evaluated impact categories were: Global warming, human toxicity in the land, human toxicity in the air, ozone formation by vegetation, ozone formation by human activities, acidifying, aquatic eutrophication (N) and land eutrophication.

On the basis of the results obtained, it was able to deduce that 89.4% of the environmental load was associated to the distribution process by truck tankers. When the analysis to a water distribution by hydraulic networks was done, it was able to deduce that 76.6% of the environmental load is defined by the electric energy in catchment, conducting and treatment processes, environmental Impacts categories are affected by every stage that form the system due to it is associated to the electric energy consumption in each one of them.

---

\*Job application to qualify the title of “Master of Environmental Engineering”

\*\*Faculty of Engineering Physicist-Chemistry UIS, School of Chemical Engineering. Director: PhD. Humberto Escalante Hernández, Codirector: PhD. Paola Andrea Acevedo Pabón

## INTRODUCCIÓN

La Empresa de Servicios Públicos de Acueducto y Alcantarillado de El Carmen de Bolívar ACUECAR S.A. E.S.P., es una empresa dedicada a la prestación del servicio de agua potable a la comunidad Carmera. ACUECAR se creó, con el apoyo del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). En el año 2015, ACUECAR S.A., es una Sociedad Anónima de carácter oficial, que fue intervenida el 11 de febrero de 2008 por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios mediante resolución SSPD-20081300003335 debido a la situación administrativa, financiera, técnica y operativa de la empresa. Desde el momento de la intervención se adelantaron procesos de operación y sostenimiento, se formularon y gestionaron proyectos para la puesta en funcionamiento del sistema de acueducto de El Carmen de Bolívar.

El MAVDT, delegó a ACUECAR S.A. E.S.P., para ajustar y preparar los procesos licitatorios para contratar un operador temporal especializado para la prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado en el municipio de El Carmen de Bolívar. En los años 2007 y 2008 se instalaron en El Carmen de Bolívar 2710 acometidas de acueducto. Desde el 2012 se están realizando pruebas hidráulicas en la redes de distribución de acueducto con excelentes resultados. A comienzo del 2013 se inició la ejecución de la construcción de la primera etapa del sistema de micromedición del acueducto para los sectores hidráulicos habilitados en el municipio, logrando 3675 suscriptores de acueducto. A finales del 2013 la autoridad ambiental del departamento de Sucre-CARSUCRE, entregó la concesión de agua del acuífero de Morroa (resolución 0454 del 21 de junio del 2013) a ACUECAR S.A., dando inicio a la operación de cobertura establecida por la empresa. En El Carmen de Bolívar se instaló el

servicio de acueducto en el 2013, bajo la gestión de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios-SSPD, el Ministerio de Medio Ambiente, la Gobernación de Bolívar y ACUECAR S.A.

ACUECAR S.A. y la SSPD buscan entregarle a la población de El Carmen de Bolívar, agua en operación continua, volumen y calidad; de acuerdo a la normatividad. En el Carmen no se dispone de acceso a aguas superficiales, la única fuente de explotación de aguas subterráneas es el acuífero de Morroa. Por lo anterior, los costos operativos del servicio de agua se incrementan, se genera un agotamiento de los recursos y a su vez una afectación al medio ambiente. Debido a esta situación, ACUECAR S.A., decide ampliar la captación de agua utilizando cuatro pozos profundos (propiedad de la empresa), ubicados en el municipio de Ovejas y dos pozos en el corregimiento del Piñal, municipio de Los Palmitos, Sucre. El acueducto de El Carmen necesita evaluar el sistema actual de distribución de agua, para determinar el impacto ambiental potencial del proceso de distribución aplicado a agua tratada, generado mejoras que garanticen un proceso sostenible.

ACUECAR S.A., es una empresa con responsabilidad ambiental, por tal razón ha venido operando bajo condiciones de mejoramiento en el diseño de la línea de conducción, para garantizar que sus procesos eviten impactos negativos en el entorno. ACUECAR S.A. ha estado realizando modificaciones tendientes a mejorar los procesos, por ejemplo: a) reemplazar tuberías de conducción de PVC a hierro dúctil, b) adecuación de equipos de bombeo de mayor capacidad, c) implementación de un sistema de telemetría y d) implementación de equipos de tratamiento de agua con nuevas tecnologías enfocadas a una óptima distribución de agua potable.

La potabilización del agua implica la protección contra microorganismos, la reducción de materia orgánica, la eliminación de sustancias tóxicas, la protección de la red de distribución contra la corrosión y contaminación durante su distribución. Los sistemas de purificación de agua tradicionales consisten principalmente en procesos físico-químicos como coagulación-floculación, filtración granular y desinfección química (BRUGGEN, et al., 2004).

Sin embargo, una planta de tratamiento de agua potable puede ser responsable de impactos ambientales globales significativos como: a) agotamiento de recursos naturales, b) liberación de agentes contaminantes en el agua, tierra y aire debido al uso de sustancias químicas y c) consumo de energía. Por lo anterior, se requiere cuantificar el impacto ambiental que genera el proceso de potabilización de agua. A fin de tener en cuenta los IA de cada alternativa de mejora, las partes interesadas deben trazar indicadores de desempeño ambiental para la producción y distribución de agua potable. Estos indicadores permitirán la referencia de los procesos existentes y definir la solución sostenible de un contexto dado (VINCE, et al., 2008).

El impacto ambiental potencial (IA) es el efecto generado en el ambiente por una acción, obra o labor industrial. Los IA en la actualidad deben ser identificados, minimizados y/o mitigados para desarrollar procesos industriales con el mínimo de perturbación al medio ambiente (CONTRERAS, 1991). Por consiguiente, es necesario adoptar metodologías de evaluación de los IA, que conlleven al diseño, mejora o desarrollo de procesos ambientales eficientes. A nivel mundial se han desarrollado metodologías de evaluación de impacto ambiental (EIA), las cuales son estudios técnicos de carácter interdisciplinar destinados a identificar, describir y valorar de manera apropiada y en función de las particularidades de cada caso

concreto, los efectos notables previsible que la realización del proyecto produciría sobre los distintos aspectos ambientales (CONESA FERNANDEZ, 1999). Las EIA emplean variables cuantitativas de los impactos, cuya potencia y versatilidad, combinadas con la ponderación de los elementos y los componentes ambientales, permiten establecer niveles de jerarquía de los diferentes impactos ambientales potenciales (IAP) que un proceso puede estar generando.

Existen hoy en día varias herramientas metodológicas que permiten realizar la valoración de los IAP. Estos impactos pueden establecerse de forma cuantitativa con indicadores o cualitativamente por medio de juicios de valor previamente establecidos. Las estimaciones realizadas por las metodologías proyectan las consecuencias ambientales de la actividad, obra o labor, lo que constituye el marco de análisis para la toma de decisiones (KURNIAWAN, et al., 2011).

Una de las metodologías más aplicadas para la evaluación de IAP es el análisis de ciclo de vida (ACV). Esta metodología permite cuantificar los IAP durante el ciclo de vida de un producto. La metodología de ACV involucra los IAP asociados a las materias primas usadas en el proceso, las etapas de transporte, los equipos y la generación de electricidad entre otros. Los anteriores aspectos y otros más pueden ser vinculados al estudio siempre y cuando influyan en el medio ambiente (RECKMANN, 2012). Mediante la metodología del ACV ha sido posible establecer los impactos ambientales potenciales que se generan en procesos como: tratamiento convencional de agua usando filtración con carbón activo y ósmosis (MOHAPATRA, et al., 2002), desinfección por radiación UV, cloro e inyección hipoclorito, utilizadas en la producción de agua potable (BEAVIS, et al., 2003), abastecimiento urbano de agua, desde la extracción de agua, producción de agua potable, uso de agua potable y tratamiento de agua residual (LANDU, et al., 2006)

Por lo anterior, la metodología de ACV puede ser utilizado para evaluar los impactos ambientales generados en el proceso de ampliación de cobertura de la red de distribución de agua potable en la población de El Carmen de Bolívar. Este estudio, permitirá proponer alternativas de mejora que contribuyan a la minimización de los impactos ambientales. Los objetivos de este estudio fueron la elaboración de una Evaluación del Impacto Ambiental Potencial, mediante la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para el proceso de captación, conducción, desinfección y distribución de agua del acuífero Morroa. El análisis de impacto ambiental se realizó desde la aducción del agua, en los pozos hasta el despacho de la misma por red o a través del suministro por carro tanques. Este estudio contempló caracterizar un escenario de línea base y un escenario futuro de acuerdo a los requerimientos de la metodología de ACV. A partir de los resultados obtenidos se plateó, como alternativa para reducir los impactos ambientales, un análisis de sensibilidad con un escenario futuro que implica una modificación en la línea de conducción y otra en el sistema de desinfección química.

Para la consecución de los objetivos propuestos, se contó con la colaboración de la empresa ACUECAR S.A., quienes suministraron información histórica, sobre el desempeño operativo de la empresa y apoyaron con la información de muestreo y caracterización de la fuente hídrica. Mediante visitas a la planta se recolectó información para levantamientos de diagramas de flujo, inventarios de masa y energía (mediante balances y cuantificación de entradas y salidas). Se realizó la actualización del mapa de proceso, como base para delimitar el sistema de estudio, de acuerdo a los requerimientos del ACV.

La evaluación de los impactos ambientales se llevó a cabo mediante el software SIMAPRO (licenciado por la UIS), a través de la metodología EDIP 2003, a partir de las categorías de impacto: calentamiento global, toxicidad de suelo y agua, salud humana, agotamiento de recursos y disminución la capa de ozono. A partir de SIMAPRO (PRE CONSULTANTS, 2008) se obtuvieron los perfiles medioambientales y de IAP de cada unidad de proceso que compone el sistema de PTAP de El Carmen de Bolívar y su distribución de agua por red de acueducto.

## **1. MARCO METODOLÓGICO**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN**

Se prevé que en las próximas décadas, el aumento en el consumo de agua potable sumado al agotamiento de los recursos provocará en el mundo un problema de escasez de agua ( SHIKLOMANOV, 1997). En el 2025, casi un tercio de la población mundial sufrirá una situación de escases hídrica (UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO)., 2003). Al mismo tiempo las necesidades de transporte de agua incrementaran la demanda energética para llevar este recurso hasta el usuario (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA)., 2005)]. El agotamiento gradual de los combustibles no renovables y las consecuencias del cambio climático, deberían conducir a cambios importantes en el suministro y uso de energía (BEYOND PETROLEUM (BP)., 2005).

En el municipio de El Carmen de Bolívar, (departamento de Bolívar, en Colombia), la captación de agua para consumo se hace a través de Pozos profundos (Acuíferos), agua de excelente calidad pero que requiere de estricto control de los lineamientos ambientales al momento de su explotación; con el fin de garantizar por muchos años el suministro a diferentes poblaciones que abastece el acuífero Morroa. Actualmente se cuenta con cuatro pozos profundos, ubicados en el municipio de Ovejas y dos pozos en el corregimiento de El Piñal, municipio de Los Palmitos, Sucre.

ACUECAR S.A., ha venido operando bajo ciertas condiciones de mejoramiento en el diseño de la línea de conducción antigua la cual está diseñada en tubería de PVC-RDE21 y será reemplazada por tubería de hierro dúctil, adecuación de equipos de bombeo de mayor capacidad (70 l/s) y optimización del proceso desinfección del agua pasando del actual proceso de cloración (hipoclorito de calcio granular) a un sistema de inyección de cloro gaseoso, lo anterior con el fin de alcanzar lo propuesto en un plan de aumento en la cobertura del servicio dentro del casco urbano del municipio.

Sin embargo, a la fecha la ACUECAR S.A., desconoce de manera cierta, los beneficios e impactos ambientales que puede estar ocasionando, con las implementaciones tecnológicas al proceso de conducción y tratamiento de agua del acuífero Morroa. La identificación del impacto ambiental y sus posibles reducciones a través de mejoras en los procesos de captación, potabilización y distribución de agua, permitiría a la empresa afianzar este tipo de programas tendientes a mejorar la cobertura y la tecnología de potabilización con el propósito de aumentar la productividad, la adecuada utilización de los recursos, la conservación del ambiente, consumos energéticos, confiabilidad del servicios, ahorro de energía fósil, optimización de redes y métodos de distribución y cumplir la normatividad ambiental colombiana.

Una planta de tratamiento de agua potable, puede ser responsable de impactos ambientales globales significativos, entre los cuales tenemos agotamiento de recursos naturales, liberación de agentes contaminadores en el agua, tierra y aire debido al uso de sustancias químicas y consumo de energía. El análisis de ciclo de vida (ACV), es un instrumento que podría ser utilizado con el fin de generar la información sobre los impactos ambientales de los sistemas de purificación de agua.

Por lo anterior se establece que mediante la aplicación de la metodología de ACV es posible evaluar los IAP del aumento de la cobertura por red de distribución de agua potable en la población de El Carmen de Bolívar, tomando como marco de referencia el calentamiento global, toxicidad de suelo y agua, salud humana, agotamiento de recursos y de la capa de ozono, con el fin de proponer alternativas de mejora que contribuyan a la minimización de los impactos ambientales generados en el aumento de la cobertura del suministro.

El objetivo del presente estudio es conducir a una evaluación de ciclo de vida comparativa entre dos escenarios de distribución de agua por red: un escenario línea base o escenario actual y un posible escenario futuro. La evaluación de ciclo de vida comparativo se llevará a cabo mediante la utilización del software SimaPro, para inventarios y fases de evaluación de impacto, bajo el método de análisis EDIP 2003.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

- Evaluar y analizar los impactos ambientales asociados al sistema de distribución de agua potable en el municipio de El Carmen de Bolívar, mediante la metodología de análisis de ciclo de vida con el fin de identificar las etapas y procesos de mayor impacto ambiental.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Realizar una revisión del estado del arte de estudios de ciclo de vida de sistema urbanos de agua con especial énfasis en países en vía de desarrollo.
- Caracterizar un escenario de línea base y un escenario futuro que serán objeto del estudio de impacto ambiental potencial de acuerdo a los requerimientos de la metodología de ACV.
- Aplicar la metodología de ACV para los escenarios propuestos desde la captación, conducción, potabilización y distribución, mediante la utilización del software SimaPro

## **2. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO**

### **2.1. PROCESO DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN EL MUNICIPIO EL CARMEN DE BOLÍVAR**

En este capítulo se presenta una descripción general del sistema de suministro de agua potable de la empresa Acuecar S.A. E.S.P., para el municipio de El Carmen de Bolívar, teniendo en cuenta sus procesos de captación, conducción, tratamiento y distribución. Adicionalmente, se expone el estado del arte sobre la utilización de la metodología del ACV, como herramienta para evaluar el Impacto Ambiental Potencial de un proceso.

#### **2.1.1. Generalidades del municipio del Carmen de Bolívar**

En Colombia, (ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, 2001) los hogares urbanos están conformados en promedio por 4 personas y los hogares rurales las familias son más numerosas, elevándose hasta un máximo de 4 a 6. En las zonas rurales se presentan los mayores niveles de hacinamiento (36%), mientras que el promedio nacional muestra un 22%. El tamaño de la familia y el nivel de hacinamiento tienden a ser mayor mientras más pobre es la zona o región. Según el censo realizado por la empresa de servicios públicos de acueducto y alcantarillado, en el municipio de El Carmen de Bolívar se establece un promedio de cinco (5) habitantes por vivienda.

En el municipio de El Carmen de Bolívar, en términos de acceso a servicios públicos se observa que, tanto en las zonas urbanas como en las rurales, las

viviendas se caracterizan por disponer de electricidad, servicios sanitarios con conexión a tanque séptico, recojo de residuos sólidos por el servicio de aseo y suministro de agua con conexión a la vivienda ya sea de acueducto público para las zonas urbanas y de la comunidad para las rurales. Las viviendas acceden al agua a través de algunas de las siguientes fuentes: acueducto público o de la comunidad, pozo con bomba, pozo sin bomba, agua lluvia, tanque comunitario, carro-tanque y aguatero. El servicio público de acueducto inicia en el municipio de El Carmen de Bolívar con un suministro de agua por redes de un 15 % en septiembre del 2013, fecha a partir de la cual bajo el proyecto de optimización de redes se ha incrementado la cobertura a un 65 % para febrero del 2015, periodos en los cuales la empresa a través de sus directivos proporcionaron la información para la realización de este trabajo.

### **2.1.2. Suministro De Agua Potable**

ACUECAR S.A., realiza el proceso de distribución de agua potable a la población perteneciente al municipio de El Carmen de Bolívar, a través de los de los siguientes subprocesos: a) captación de agua subterránea, b) conducción de agua cruda, c) tratamiento de agua, d) distribución de agua potable (ver **Figura 1**).



**Figura 1.** Sistema de distribución de agua: municipio El Carmen de Bolívar.

### 2.1.2.1. Subproceso 1: Captación de agua subterránea

La producción promedio de agua que abastece la población de El Carmen de Bolívar es de 65 l/s [Formato control de producción diario FC-ERB01, periodo 2013-2015], los cuales se generan a través del proceso de captación de agua subterránea con un sistema de extracción conformado por una batería de seis pozos profundos, quipos eléctricos, dos líneas de impulsión hasta la estación de rebombeo y una línea de impulsión hasta la cámara de quiebre de presión, con conducción hasta los tanques de almacenamiento y red de distribución.

El subproceso de captación de agua subterránea se realiza a través de pozos profundos ubicados en el acuífero de Morro en el municipio de Ovejas. Este acuífero está ubicado entre los departamentos de Sucre y Córdoba, el cual posee una extensión de 9.000 km<sup>2</sup>.

El acuífero de Morro abastece una población actual de 500.000 habitantes a través de los acueductos municipales de El Carmen de Bolívar, Sincelejo, Corozal, y Sampués, Ovejas, Los Palmitos, Morro y San Juan de Betulia, además otros municipios del departamento de Córdoba. El acuífero se encuentra ubicado en la jurisdicción de CARSUCRE (Corporación autónoma regional de Sucre) la cual es responsable de administrar y proteger el recurso hídrico. Acuecar S.A. E.S.P., actualmente maneja la concesión seis (6) pozos profundos denominados como pozo No. 7, 8, 9, 13, A y B. Los primeros cuatro ubicados en el municipio de Ovejas (Sucre) y los últimos (A y B) ubicados en el corregimiento El Piñal, municipio de los Palmitos (Sucre).

La **Figura 2** presenta el pozo No. 13, el diseño de los pozos está conformado por una caseta de control para equipos de macromedición, bomba de succión, tubería de extracción y tubería de aducción.



**Figura 2.** Campo de Pozos. Pozo No. 13

Debido a que las captaciones provienen de la explotación de aguas subterráneas, se utiliza un sistema de macromedición el cual permite el registro y medición de caudales en volumen y tiempos reales, igualmente se realiza el seguimiento de niveles dinámicos y estáticos del sistema, registrando la explotación por medio de macromedidores tipo mecánico y electromagnético.

En condiciones normales de funcionamiento y teniendo en cuenta los requerimientos de CARSUCRE, se reportan los datos tomados en campo a cada uno de los pozos en funcionamiento. Determinando los comportamientos hidrogeológicos, se midieron y se obtuvieron cifras correspondientes a niveles estáticos y dinámicos de los pozos, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

<b>Pozo</b>	<b>Nivel estático nominal (resolución)</b>	<b>Nivel estático de operación</b>	<b>Nivel dinámico nominal (resolución)</b>	<b>Nivel dinámico de operación</b>
<b>7</b>	4,90	4,8	46,7	45
<b>8</b>	7,55	7,0	64,05	64
<b>9</b>	42,34	42,0	88,93	89
<b>13</b>	15,12	17,0	74,09	76
<b>A</b>	27,42	28,5	70,4	72
<b>B</b>	46,97	48,5	105,34	86

**Tabla 1.** Niveles de Operación campo de pozos.

**Fuente:** Autor

Según la concesión de pozos otorgada por la Corporación Autónoma de Sucre (CARSUCRE), los pozos están autorizados para una captación de agua por medio de bombeo, teniendo en cuenta los caudales otorgados por la autoridad ambiental, determinados mediante pruebas de bombeo de 24 horas. La **Tabla 2** representa los caudales concesionados y explotados en el proceso de captación, por la empresa Acuecar S.A. Los pozos operan en relación al índice de disponibilidad de 18 horas/día de operación e indisponibilidad de 6 horas/día de recuperación.

<b>Pozo (Nº)</b>	<b>Caudal Concesionado (l/s)</b>	<b>Caudal explotado (l/s)</b>
<b>7</b>	10	9,67
<b>8</b>	10	10,0
<b>9</b>	10	10,0
<b>13</b>	5	4,61
<b>A</b>	60	61,0
<b>B</b>	50	52,0

**Tabla 2.** Caudal (l/s) concesionado y explotado

**Fuente:** Autor

### **2.1.2.2. Campo De Pozos**

El volumen de agua captado tiene como objeto de concesión la explotación del recurso hídrico con la finalidad mitigar los problemas de demanda del mismo en el casco urbano del Municipio de El Carmen de Bolívar, con un uso para consumo humano. Los pozos activos se encuentran en el campo de pozos Ovejas y campo de pozos El Piñal.

#### **a) Campo de pozos Ovejas**

La zona donde se encuentra el campo de pozos Ovejas, ha sido cartografiada geológicamente como la formación Morroa, la cual es considerada en la zona como un acuífero multicapa. Litográficamente esta formación está constituida principalmente por capas de areniscas friables y conglomerados poco consolidados, intercalados con capas de arcillolitas, producto de la sedimentación detrítica en un ambiente típico de abanico aluvial y cauces aluviales. La **Tabla 3** presenta una descripción de las condiciones del diseño de los 4 pozos activos pertenecientes al campo de pozos Ovejas.

Pozo	Distancia a la estación de rebombeo (m)	Profundidad (m)	Revestimiento	Diámetro
PP-07	3100	255	Acero al carbón 40	12 y 8"
PP-08	3100	208		10 y 8"
PP-09	1400	255		10 y 8"
PP-13	1670	142.5		10 y 8"

**Tabla 3.** Característica de diseño de pozos Ovejas.

**Fuente:** Autor

### **b) Campo de pozos Piñal**

El área donde se localizan los pozos, de acuerdo al estudio geológico, geofísico e hidrogeológico del acuífero Morroa realizado en el sector de exploración Piñal, dato suministrado por la firma GMAS, la cual presenta una extensión morfológica representada por colinas suaves, con diferencias mínimas de altura de 130 m.

La formación Morroa está constituida por litoarenitas de grano medio y grueso, sub-redondeadas, bien sorteada, con niveles conglomeráticos de guijos y gránulos de cuarzo lechoso y líticos ígneos con textura porfirítica principalmente y delgadas intercalaciones de lodolitas frises masivas; son constantes las concreciones calcáreas singenéticas, las cuales disminuyen en tamaño de base a tope con diámetros que oscilan entre 5 y 30 cm.

En el sector se obtuvieron transmisibilidades que oscilan entre 106 y 187 m<sup>2</sup>/día y conductividades hidráulicas entre 0.74 y 0.85 m/día. La Tabla 4 presenta una descripción de las condiciones del diseño de los pozos activos pertenecientes al campo de pozos El Piñal.

Pozo	Distancia a la estación de rebombeo (m)	Profundidad (m)	Revestimiento	Diámetro
PP-A	13700	778	Acero al carbón 40	12 y 8"
PP-B	14900	472		10 y 8"

**Tabla 4.** Característica de diseño de pozos El Piñal.

**Fuente:** Autor

La explotación de cada uno de los pozos se realiza teniendo en cuenta los caudales concesionados y los equipos eléctricos (Bomba y motor) instalados para su operación. El agua captada es conducida a través de las líneas de impulsión que llegan a la estación de Rebombeo Ovejitas. La siguiente tabla presenta las características de la línea de aducción de campo de pozos a la estación de Rebombo Ovejitas.

Pozo	Longitud de tubería a la estación de rebombeo (km)	Material	Diámetro de tubería (pulgadas)	Equipos eléctricos (Motor+bomba)
PP-07	0,5	PVC RDE21	10	Franklin Electric 20 Hp
	1,6		12	-
	1,0		14	-
PP-08	0,5		6	Franklin Electric 30 Hp
PP-09	1,4		8	Franklin Electric 20 Hp
PP-13	1,0		6	Franklin Electric 10 Hp
PP-A	3,9		14	Franklin Electric 250 Hp
PP-B	5,1		14	Franklin Electric 250 Hp
PP-A, B	9,8		18	-

**Tabla 5.** Características de la línea de aducción.

**Fuente:** Autor

### **2.1.2.3. Subproceso 2: Conducción de agua cruda**

Se denomina línea de conducción a la parte del sistema constitutivo por el conjunto de ductos y accesorios destinados a transportar el agua desde donde se encuentra en estado natural hasta un punto que puede ser un tanque de almacenamiento o bien una planta potabilizadora; la capacidad de esta línea debe calcularse con el gasto máximo diario.

El proceso de conducción de agua cruda realizado por la empresa ACUECAR S.A. E.S.P., inicia en la estación de Rebombéo Ovejitas ubicada en el municipio de Ovejitas (Sucre) a 26 Km del municipio de El Carmen de Bolívar. Este proceso se lleva a cabo a través de una línea de conducción por bombeo diseñada en tubería de PVC, clase RDE21, con una presión de trabajo de 200 PSI a 23°, la cual se encuentra enterrada a lo largo del trayecto hasta llegar a la planta de tratamiento.

El aire en las tuberías puede causar problemas operacionales: disminución de la capacidad (reducción del área de la sección transversal) y variación en el flujo producido por la expansión y contracción del aire en la línea. Las variaciones de flujo pueden establecerse a través de sobrepresiones que producen movimientos súbitos de aire de una posición a otra seguidos por el golpe de agua. Teniendo en cuenta lo anterior a través de la línea de conducción se han instalado cinco ventosas para evitar la presurización del sistema.

La tubería de conducción está diseñada en un diámetro de 14 y 16 pulgada en PVC RDE21 fabricante PAVCO. Los tubo sistemas PVC Presión de PAVCO son fabricados de PVC (Policloruro de Vinilo), diseñados para transportar agua para consumo humano a presión. Este material garantiza la conservación de la calidad del agua ya que ha sido verificado de acuerdo a la ANSI/NSF 61:02 sin exceder

los valores máximos de aluminio, antimonio, cobre, arsénico, bario, cadmio, cromo, plomo, mercurio, níquel, selenio y plata que establece el decreto 1575 de 2007 y la resolución 1575 de 2007. La resina de PVC con que se fabrica ha sido certificada de tal forma que el cloruro de vinilo monómero residual es menor a 3,2mg/kg. Los tubo sistemas PVC presión de PAVCO son fabricados para ser unidos con cemento solvente. Los tubos vienen de extremo liso y los accesorios con campana.

El uso de tubería en PVC presenta las siguientes ventajas:

- Menores pérdidas de presión: Debido a la superficie interior de la tubería PVC es lisa, reduciendo considerablemente las pérdidas de presión por fricción.
- Facilidad de Instalación: El sistema de unión de los Tubo sistemas PVC Presión de PAVCO consiste en conexiones soldadas. Este sistema de unión por medio de soldadura líquida, forma un conjunto homogéneo que desarrolla máxima resistencia en un mínimo de tiempo. Como consecuencia la instalación es muy sencilla, rápida y segura. El equipo necesario es mínimo, no se necesitan tarrajas y basta una segueta o un serrucho para hacer los cortes.
- Resistencia a la Corrosión Interna: Resisten al ataque químico de la mayoría de los ácidos, álcalis, sales y compuestos orgánicos como alcoholes e hidrocarburos alifáticos dentro de los límites de temperatura y presión especificados en este manual por lo tanto elimina las desventajas de las tuberías metálicas que requieren revestimiento interno de vidrio o cerámica.

- Resistencia a la Corrosión Externa: La tubería en PVC Presión de PAVCO no son atacados por gases industriales, humedad, agua salada, condiciones climatéricas o condiciones del subsuelo.
- Inmune a la acción electrolítica: son inmunes a los efectos galvánicos o electrolíticos y por lo tanto pueden usarse enterrados o sumergidos, en presencia de metales o conectados a ellos.
- Libre de Olor, Sabor o Toxicidad: Son inodoros, sin sabor y no tóxicos; estas propiedades los hace ideales para ser usados en la conducción de drogas y alimentos líquidos.
- Químicamente Inerte: Son inertes a la mayoría de los reactivos químicos, eliminando así la posibilidad de contaminación o modificación de las propiedades de los líquidos transportados. Para la conducción de líquidos especiales consulte directamente el Departamento Técnico de PAVCO.



(a) (b)

**Figura 3.**(a)Tanques de recepción estación de rebombeo. (b) Equipos de impulsión estación de rebombeo.

El agua que llega del campo de pozos a la estación de rebombeo Ovejitas es almacenada en dos tanques de recepción en concreto semienterrados con capacidad de 500 m<sup>3</sup> (**Figura 3(a)**) cada uno, e impulsada a lo largo de la línea de conducción con un sistema de dos impulsadoras marca Siemens de 135 hp (**Figura 3(b)**) bajo una presión de 300 psi y un caudal de salida de la estación de Rebombeo de 70 l/s.

La **Tabla 6** presenta las características de la línea de conducción desde la estación de rebombeo Ovejita a la estación de El Prado (planta de tratamiento y almacenamiento).

<b>Longitud línea de conducción (Km)</b>	<b>Material</b>	<b>Diámetro tubería (pulgadas)</b>	<b>Equipos eléctricos (Impulsadoras)</b>
<b>10,6</b>	PVC	16	Siemens 135 Hp
<b>14</b>	PVC	14	

**Tabla 6.** Características de la línea de conducción.

**Fuente:** Autor

#### **2.1.2.4. Subproceso 3: Tratamiento de agua potable**

En la planta de tratamiento de agua potable de ACUECAR S.A., se cuenta con equipos y procesos que garantizan el cumplimiento de los parámetros de calidad establecidos para agua potable por parte de la autoridad ambiental. La planta de tratamiento de agua potable, se encuentra ubicada en la estación de El Prado en el casco urbano del municipio. En este subproceso de tratamiento el agua es recibida con un caudal de 65 l/s a través de la línea de conducción que viene

desde la estación de Rebombéo Ovejitas y almacenada en tres tanques semienterrados en concreto con capacidad de 800 m<sup>3</sup> cada uno.

Posteriormente se realiza el proceso de potabilización (cloración) en cada tanque de almacenamiento con la adición de hipoclorito de calcio granular al 70% marca puriflex, previamente disuelto en un tanque de homogenización de 500 litros e impulsado con una bomba de 0.5 hp, para mantener una concentración de cloro residual de 1.0 ppm en el agua almacenada, con el fin de dar cumplimiento a lo establecido en la resolución 1575 de 2007.

#### **a) Métodos de desinfección**

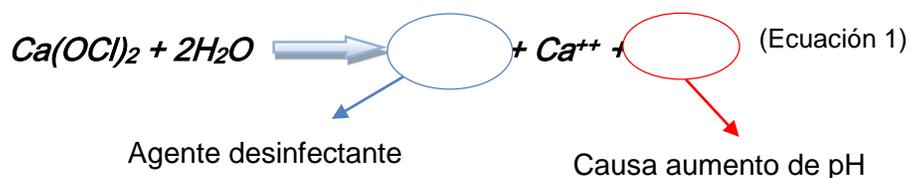
El más importante requerimiento individual del agua de consumo humano es que debe estar libre de cualquier microorganismo que pueda transmitir enfermedades al consumidor. Los procesos de almacenamiento, sedimentación, coagulación, floculación y filtración rápida, reducen en grado variable el contenido bacteriológico del agua, pero esto no asegura que el agua que producen sea bacteriológicamente apta para el consumo, por lo cual se necesita de una desinfección final. La desinfección del agua se encarga de la destrucción y/o desactivación completa, de los microorganismos dañinos presentes en el agua. Se le realiza usando medios físicos o químicos. Los siguientes factores influyen en la desinfección del agua:

- La naturaleza y número de los organismos a ser destruidos.
- El tipo y concentración del desinfectante usado.
- La temperatura del agua a ser desinfectada: cuanto más baja sea la temperatura, más rápida y eficiente es la desinfección.

- El tiempo de contacto; el efecto de desinfección se vuelve más completo cuando los desinfectantes permanecen más tiempo en contacto con el agua.
- La naturaleza del agua a ser desinfectada; si el agua contiene materia particulada, especialmente de naturaleza coloidal y orgánica, el proceso de desinfección es generalmente obstaculizado.
- El pH del agua.
- Mezcla; una buena mezcla asegura la adecuada dispersión del desinfectante a través de toda el agua y así, promueve el proceso de desinfección.

Dentro de los métodos convencionales de cloración la empresa ACUECAR S.A ha implementado en la planta de tratamiento cloración con Hipoclorito de Calcio. El hipoclorito de Calcio puro ( $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ) tiene de 60 a 70% de contenido disponible de cloro y se conserva durante más de un año bajo condiciones normales de almacenamiento. El hipoclorito de Calcio se obtiene en paquetes de 2,3 kg y en latas de hasta 45 kg.; también están disponibles en forma granular o de tabletas. Es inestable cuando se expone a la luz solar y a fuentes térmicas (mayor de  $50^\circ\text{C}$ ). Es un buen desinfectante, bactericida, algicida, fungicida y blanqueador. Altera su composición química cuando es almacenado en lugares húmedos; el producto es higroscópico.

La reacción química del hipoclorito de calcio en el agua es:



La especie desinfectante es el ácido hipocloroso (HOCl), el cual se disocia en iones hidrógenos (H<sup>+</sup>) e hipoclorito (OCl<sup>-</sup>) y adquiere sus propiedades oxidantes:

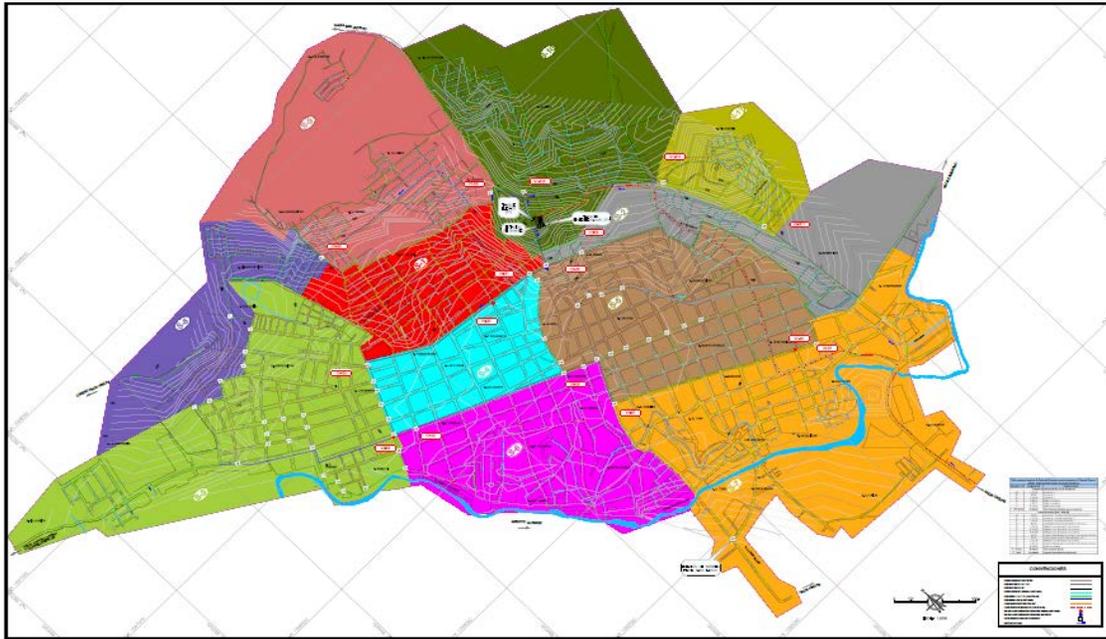


El ácido hipocloroso (HOCl) y el ion hipoclorito (OCl<sup>-</sup>), son los dos tipos de moléculas que junto con el cloro elemental (Cl<sub>2</sub>) conforman el cloro libre. Estos dos compuestos se forman cuando los hipocloritos entran en contacto con el agua. Aunque estas dos sustancias realizan la acción de desinfección, su comportamiento y eficacia es distinta. El ácido hipocloroso tiene 100 veces mayor potencia que el ion hipoclorito. La menor eficiencia del hipoclorito se debe a la carga negativa de la pared que protege las bacterias presentes en el agua y al ser el hipoclorito un ion cargado negativamente se repelen, lo que dificulta la penetración de la pared bacteriana.

#### **2.1.2.5. Subproceso 4: Distribución de agua potable**

Este subproceso de distribución se realiza desde los tanques de almacenamiento ubicados en la estación de El Prado, mediante la conducción por gravedad de agua potable a través de las redes de acueducto con un caudal promedio de 83 l/s que abastecen los sectores 3, 4, 5, 6 y 7 para un total de 7.590 usuarios y carro tanques que abastecen 3.593 usuarios, para un volumen promedio de distribución 61.793 m<sup>3</sup>/mes. El Carmen de Bolívar está dividido en 11 sectores los cuales cuentan con red domiciliaria de acueducto y válvula de control por sector. En la siguiente figura se presenta la distribución por sectores del municipio.

En la **Tabla 7** se presenta el número de viviendas que se abastecen del servicio de acueducto según el tipo de distribución de agua potable.



**Figura 4.** Mapa sectorización de El Carmen de Bolívar.

Sector	Color en el mapa	No. Viviendas	Tipo de Distribución
1	Rojo	1122	Carro tanque
2	Gris	425	Carro tanque
3	Verde	1809	Redes
4	Cyan	916	Redes
5	Marrón	1896	Redes
6	Magenta	1233	Redes
7	Amarillo	1736	Redes
8	Azul	326	Carro tanque
9	Rojo oscuro	772	Carro tanque
10	Negro	634	Carro tanque
11	Verde oscuro	314	Carro tanque

**Tabla 7.** Sectorización red de distribución El Carmen de Bolívar.

**Fuente:** Autor

**Distribución por carro tanques (agua en bloque):** el llenado de los carro tanques se realiza por gravedad desde un tanque elevado de 50m<sup>3</sup> que es alimentado por impulsión con dos equipos marca Siemens de 7.5 hp. El agua en bloque es llevada a los sectores que no cuentan con servicio de acueducto debido a que las redes se encuentran inhabilitadas, manejando un volumen promedio de consumo de 7500 m<sup>3</sup> en épocas de verano y 4000 m<sup>3</sup> para épocas de invierno. La **Tabla 8** presenta el número de carro tanques utilizados y la capacidad de cada uno de ellos.

Carro tanque	Capacidad (m <sup>3</sup> )	Combustible	Cilindraje (cc)
Dodge	10	Diesel	3250
Dodge	10		5700
Chevrolet	7		3542
Chevrolet	10		4500

**Tabla 8.** Tipo de vehículos para transporte de agua en bloque.

**Fuente:** Autor

**Distribución por redes:** La empresa ACUECAR S.A. E.S.P., diseño un sistema de redes de distribución constituido por una tubería principal de 12 km en PVC de 8", 10" y 12", de las cuales se empalman las acometidas domiciliarias en tubería PVC RDE 26 PR160PSI con diámetro de 3", 4", 6" y 8". El suministro de agua por redes se realiza por 6 horas diarias en cada sector. La siguiente tabla detalla la longitud total de tubería por sector.

Sector	Longitud de tubería (m)					
	PVC 3 RDE 26	PVC 4 RDE 26	PVC 6 RDE 26	PVC 8 RDE 26	PVC 10 RDE 26	PVC 16 RDE 26
1	5930	3252	1859	368	-	-
2	1413	3850	248	494	-	-
3	2194	1875	198	254	-	-
4	1957	1641	128	98	-	-
5	4784	2376	1263	346	-	-
6	6842	4512	1245	963	-	-
7	9657	5490	1849	421	-	-
8	2765	1197	1141	-	-	-
9	5797	2587	1029	2467	349	-
10	5455	4412	1837	2085	848	249
11	1252	1871	-	1139	-	-

**Tabla 9.** Tubería de presión PAVCO instalada en redes de distribución.

**Fuente:** Autor

## 2.2. IMPACTO AMBIENTAL

Impacto ambiental (IA) es cualquier cambio en el medio ambiente (aire, tierra, flora, fauna, seres humanos y sus interrelaciones) adverso o beneficioso como resultado total o parcial de los aspectos ambientales de una organización (INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION., 2004). El impacto Ambiental en el contexto de producción, se refiere a todas aquellas emisiones de gas, contaminación hídrica y de suelos y demás efectos causados por el uso de los recursos en la creación de un producto, es decir, la producción se interpreta en términos de impacto potencial en la naturaleza o medio ambiente, como por ejemplo: la eutrofización (abundancia anormalmente alta de nutrientes), la acidificación, el cambio climático, toxicidad terrestre, uso de energía no renovables y la ocupación de la tierra (WERFF, et al., 2009).

El impacto ambiental de un producto inicia con la extracción de las materias primas y termina cuando la vida útil del producto finaliza, convirtiéndose en un residuo que ha de ser gestionado adecuadamente. Durante la fabricación, las empresas deben evaluar el impacto ambiental que tiene su proceso, además tiene la responsabilidad sobre los impactos que ocasionan las partes involucradas en el proceso hasta que el producto llega al cliente consumidor. Se han diseñado metodologías de evaluación de impacto ambiental (EIA); estos métodos hacen referencia a los impactos ambientales específicos para cada actividad, lo cual imposibilita establecer un método general de evaluación.

Los métodos están encaminados a identificar, predecir y evaluar los IA en escenarios particulares; para la adecuada selección de la herramienta de valoración es necesario tener en cuenta los recursos técnicos y financieros, del tiempo disponible para su ejecución, de la cantidad y calidad de la información disponible y de los métodos para su posible obtención, de los aspectos legales y administrativos y de los términos de referencia propuestos; razón por la cual, ningún método puede ser considerado el mejor (CONESA FERNANDEZ, 1999).

Para la obtención de la información requerida en las evaluaciones ambientales destaca la utilización de metodologías y técnicas de medición, ya que con ellas es posible realizar adecuadamente una predicción, identificación e interpretación del impacto en los diferentes componentes del medio ambiente (ESPINOZA, 2007). Dentro de las metodologías de evaluación de impacto ambiental, se pueden destacar las siguientes (ver **Anexo B** )

- Lista de Chequeo, control o verificación (LCH)
- Métodos matriciales (MM)
- *Matriz de Leopold (ML)*
- Redes (R)
- Matriz de Batelle-Columbus (MBC)
- Matriz de Conessa (MC)
- Análisis de ciclo de vida (ACV)

### **2.2.1. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

El análisis de ciclo de vida (ACV), en teoría, es un método analítico (CHACÓN, 2008) que contempla y hace una interpretación de los impactos ambientales potenciales de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida. El ACV es “la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema producto a través de su ciclo de vida” (INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION., 2007). El análisis incluye entonces la extracción de materias primas, producción, transporte, distribución, uso, reciclaje y disposición final. El ACV solía recibir anteriormente otros nombres, tales como ecobalances, análisis del perfil ambiental y de recursos, análisis ambiental integral, perfiles ambientales, entre otros, y se le comparaba con otras herramientas tales como evaluación del riesgo ambiental y la evaluación de impacto ambiental en cuanto al alcance, las ventajas y las desventajas entre uno y otro métodos (BAUMANN, et al., 2004).

Quizás uno de los primeros estudios en los que se empezaron a tener en cuenta los impactos ambientales de los productos fue el que Harold Smith presentó en la Conferencia Mundial de Energía de 1963, en el que informaba sobre las

cantidades de energía para la fabricación de productos químicos. Otro trabajo que puede catalogarse de pionero y en el que se aplicó el concepto de ciclo de vida se hizo entre 1960 y 1970, para determinar requerimientos de energía de algunos procesos y sistemas y el análisis de los efectos ambientales por el empleo de la energía. Se elaboró con el auspicio del Departamento de Energía de Estados Unidos (LETCHER, 2008). En 1969, Harry E. Teasley Jr., de Coca-Cola Company, quien estaba al mando de la División de Envases, encargó un estudio al Midwest Research Institute (MRI), con el objeto de determinar las cantidades de energía, materiales e impactos ambientales asociados a lo largo del ciclo de vida de envases, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. A este trabajo se le denominó “Análisis del perfil ambiental y de recursos” (Resources and Environmental Profile Analysis). (HUNT, et al., 1996). En los años siguientes, se continuó el perfeccionamiento de esta metodología de evaluación de IAP, vinculando a su metodología balances másicos y energéticos (BENETTO, et al., 2008).

La utilidad de los estudios de ACV se masifico hacia los años 80s, años en los cuales se cambió el modelo para la cuantificación de los IA de procesos, bienes y servicios; a la par de este cambio, los estudios de ACV adquirieron cierta madures metodológica y rigurosidad técnico científica (ARNOLD, 2010). En 1993 se formuló el primer texto con fines metodológicos para la aplicación de los estudios de ACV y posteriormente la Organización Internacional de Estandarización (ISO) desarrollo un documento que cumplió los pasos de aplicación del ACV, en el documento se especifican estándares para la definición de la meta y el alcance, evaluación del inventario, evaluación del impacto e interpretación del ACV (GARCÍA, et al., 2011).

La norma ISO 14040 establece que el ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e IAP asociados a un producto, servicio o actividad, lo cual se efectúa recopilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto, en relación con los objetivos del estudio.

Empleando una herramienta basada en ACV, utilizada sistemáticamente en la evaluación ambiental de las alternativas de producción de agua potable, se encontró que la fuente principal de los impactos ambientales se debe a la producción de electricidad para el funcionamiento de la planta de producción de agua (VINCE, et al., 2008).

El grupo en Investigación y Consultoría KIWA (KIWA., 1998), desarrollaron el software LCAqua en 2001. Este software, se dedicaba al ACV de la producción de agua potable, basado en el software SimaPro y en el Eco-Indicador 99, método para la evaluación de impactos del ciclo de vida (LCIA). En este software, no se tiene en cuenta la infraestructura de la planta de producción de agua potable ni las descargas de líquidos en el proceso de tratamiento utilizando LCAqua para comparar una planta de tratamiento de agua convencional (clarificación, filtración y desinfección) usando carbón activado granular (GAC) para filtración con una planta de tratamiento de aguas usando un proceso de membrana de nanofiltración (SOMBEKKE, et al., 1997). Las dos plantas obtienen una puntuación ambiental similar, las etapas más contaminantes identificados fueron: consumo de electricidad, regeneración de GAC y ablandamiento del agua. (MOHAPATRA, et al., 2002), utilizó LCAqua para evaluar los impactos ambientales de una planta de tratamiento convencional con filtración GAC, comparada con la integración de dos alternativas de ósmosis en la etapa de tratamiento, obteniendo una puntuación

similar donde el consumo de electricidad, la regeneración del GAC y el ablandamiento son las etapas de mayor contaminación. Basados en los dos estudios, se puede concluir que la contribución de la electricidad y el consumo de productos químicos generan impactos similares significativos.

Beavis et al (2003), compararon diferentes técnicas de desinfección utilizadas en la producción de agua potable y tratamiento de aguas residuales con el método CML y el software Gabi. Entre las técnicas de desinfección (Radiación UV, el cloro y la inyección de hipoclorito), la radiación UV es la que mayor categoría de impacto presenta (ecotoxicidad, eutrofización y calentamiento global), debido a su alto consumo de energía.

Friedrich (2001), analizó una planta de tratamiento de agua convencional comparada con una planta de tratamiento de agua que utiliza en su proceso una membrana de ultrafiltración, utilizando el software Gabi con el método CML. El lavado de ultrafiltración no se tuvo en cuenta. La planta convencional y la planta con tratamiento de membranas presentan impactos comparables. El consumo de energía fue responsable de más del 80% de los impactos ambientales para las dos tecnologías. La mayor etapa de contaminación fue la ozonización y los lodos. Los impactos asociados a la fase de desmantelamiento fueron insignificantes, la etapa más contaminante del desmantelamiento fue el reciclaje del acero.

Con el fin de evaluar el agotamiento de los recursos, Lundu et al, (2006), compararon los impactos de la producción de agua potable y la distribución de los recursos minerales, aire, agua y tierra, con un índice de indicadores de agotamiento de recursos adaptados del método LMC (BRENT, 2004). Las conclusiones afirmaron que los recursos hídricos eran los más afectados. El mayor

impacto asociado al recurso agua fue el uso de la misma, para el recurso tierra se presentó la mayoría de impactos debido a la acidificación. A mayor escala de abastecimiento urbano de agua (extracción, producción de agua potable, uso del agua y tratamiento de aguas residuales), se realizaron varios estudios que confirmaron las conclusiones anteriores, destacando la importancia del bombeo y distribución de agua en comparación al proceso de tratamiento del agua.

Lundie et al, (2004), realizaron un estudio para planificar la prestación de servicios de agua y alcantarillado proyectados al año 2021 en Sydney, utilizando el Software Gabi y el método CML EICV. La producción de agua potable fue solo una parte del sistema estudiado; este estudio demostró que la distribución de agua y el tratamiento de aguas residuales generarían más impactos que el proceso de tratamiento del agua. Utilizando indicadores de sostenibilidad ambiental, para la identificación de los principales impactos asociados a sistemas de agua urbanos para la producción de agua potable, se demostró que los principales impactos identificados en la producción de agua potable fueron los productos químicos, el uso de energía, el uso de agua y la disposición de lodos (LUNDIN, et al., 2002).

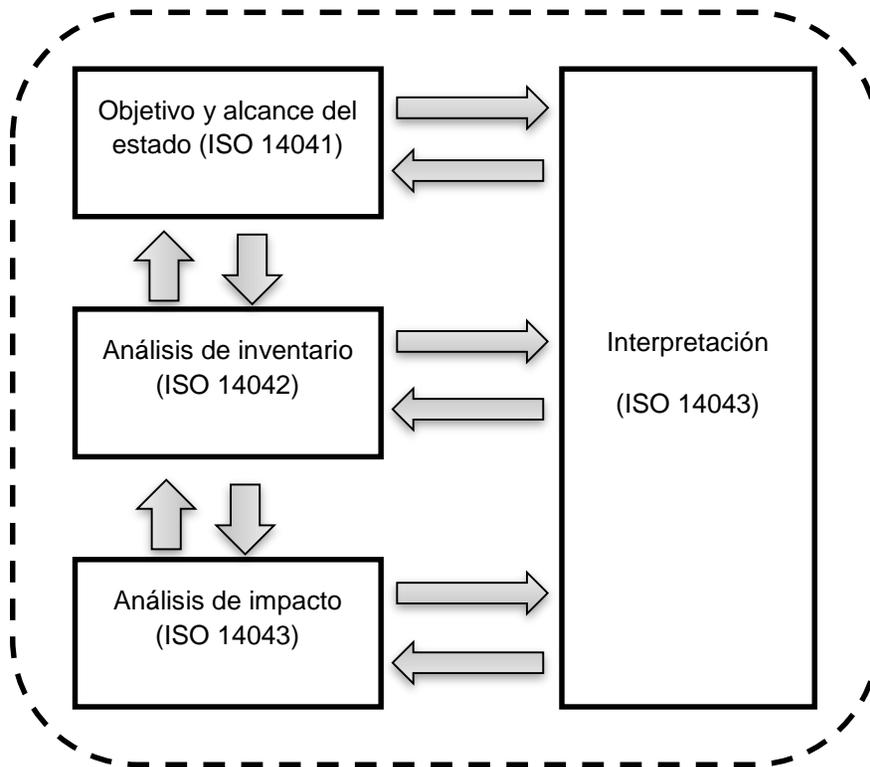
Tarantini et al, (2001), estudiaron un sistema de abastecimiento de agua para uso doméstico, en Bologna, con diferentes métodos ACV (CML 92, CST 95, USES 1998), encontrando que para la producción de agua potable a través de un método convencional, sus impactos (uso de energía, ecotoxicidad acuática y acidificación) fueron mayores en comparación a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), debido al alto consumo de electricidad durante el bombeo en la planta de agua potable.

El ACV se utiliza ampliamente en el ámbito de la gestión de aguas urbanas o para una parte del mismo (tratamiento de agua potable o aguas residuales) (RENOU, et al., 2008). El ACV se utiliza principalmente para la evaluación del sistema y para

identificar las opciones de mejora y en algunos casos para el desarrollo de indicadores de sostenibilidad. Friedrich et al.(2009), Rihon et al. (2002), Lundie Gregory y Beavis, (2004) y Teng (2006) utilizaron ACV para la evaluación de los impactos ambientales del sistema de agua urbana en Durban, cuenca hidrográfica del "La Vesdre" en Bélgica, la ciudad de Sydney, y los Países Bajos, respectivamente. Mohapatra et al. (2002), Friedrich y Buckley (2001), y Houillony Jolliet (2005) utilizaron ACV para comparar tecnologías de tratamiento de agua. La evaluación de la variación de los impactos ambientales que pueden resultar a partir del cambio de las aguas residuales en sistemas centralizados y sistemas de tratamiento descentralizados, también se estudiaron por ACV (TILLMAN, et al., 1998) (LASSAUX, et al., 2001).

#### **2.2.1.1. Fases del ACV**

De acuerdo con la metodología propuesta por la normativa ISO 14040 un proyecto a ACV puede dividirse en cuatro fases: objetivos y alcance del estudio, análisis del inventario, análisis del impacto e interpretación. La siguiente **Figura 5**, ilustra estas cuatro fases las cuales no son secuenciales. El ACV es una técnica que permite ir incrementando el nivel de detalle en sucesivas iteraciones.



**Figura 5.** Las fases de un ACV de acuerdo a ISO 14040

En el **Anexo B** se presenta en detalle la descripción de las fases del análisis de ciclo de vida a estudiar.

### 2.2.1.2. Categorías de impacto

Las categorías de impacto son los efectos sobre el medio ambiente que causan los aspectos medioambientales del sistema o producto en estudio. Las categorías de impacto se definen de acuerdo al impacto potencial que pueda generar el sistema. Las categorías de impacto agrupan sustancias contaminantes en indicadores de categoría, estas categorías pueden ser de dos tipos: de corte medio y final. Las categorías de impacto de corte medio son: a) potencial de

calentamiento global, b) potencial de eutrofización, c) potencial de acidificación, d) uso de recursos abióticos, e) el consumo de energía primaria y f) el uso de suelos.

Las categorías de impacto de corte final, son variables que afectan directamente a la sociedad, por tanto su elección resultaría más relevante y comprensible a escala global. Sin embargo, la metodología para llegar a cuantificar el efecto último no está plenamente elaborada, no existe suficiente consenso científico (HERWICH, et al., 1997). Por todo ello, actualmente se recurre a categorías e impacto intermedio que se hallan más cercanas a la intervención ambiental, permitiendo así modelos de cálculo, que permiten una mayor información sobre la manera y el punto donde se afecta el medio ambiente.

La selección de categorías de impacto debe enfocarse en la categorías de IA, que son de relevancia para el estudio, la cuales deben abarcar efectos globales, efectos regionales y locales (ROY, et al., 2009). Existe un gran número de métodos de impacto aplicados a los ACV, la elección del método más apropiado para el estudio debe estar condicionada al objeto y alcance del mismo. Para el ACV de la red de distribución de agua potable en el municipio de El Carmen de Bolívar, se seleccionaron las metodologías de evaluación de IA EDIP 2003 relacionadas en el software SIMAPRO. Estas categorías de impacto en el son de carácter atribucional, el cual describe los flujos hacia el medio ambiente durante el ciclo de vida de un producto, en relación a la unidad funcional. En el **Anexo C** se presenta la descripción de las categorías de impacto a evaluar.

La **Tabla 10**, describe brevemente la metodología de análisis seleccionada para el ACV del presente estudio.

MÉTODO	DESCRIPCIÓN
<b>EDIP 2003</b>	Environmental Desig of Industrial Products EDIP 2003. De origen Danés, involucra parámetros relacionados con el destino y la exposición de los residuos o de los productos generados. Está orientado al diseño de productos y procesos (RALUY, 2009). Es un método muy completo en categorías.

**Tabla 10.** Método de evaluación seleccionado para el ACV.

### 2.2.1.3. SimaPro

Existe una variedad de programas informáticos (software) basados en la metodología de análisis de ciclo de vida, para llevar a cabo la evaluación de los impactos ambientales generados en el desarrollo de una actividad o proceso, los cuales pueden variar en la calidad y extensión de la información según las bases de datos. En el software se introducen los datos del inventario para llevar a cabo los cálculos de la fase de análisis del inventario, obteniéndose los resultados para las diferentes categorías de impacto seleccionadas. Los software más utilizados a nivel mundial por su facilidad de manejo son SIMAPRO, TEAM y Umberto (LUNDIE, et al., 2005).

En la **Tabla 11** se presentan las principales herramientas ofimáticas para el desarrollo de ACV.

SOFTWARE	COMPAÑIA	PAIS	OBSERVACIONES
<b>Eco-it</b>	PréConsultants	Países bajos	Indicado especialmente para diseñadores de productos y envases. Manejo sencillo. Utiliza el EI 99.
<b>Ecopro</b>	Sinum A.G. Eco Performance Systems	Suiza	Permite la realización sencilla de CV del producto. Utiliza la librería BUWAL.

<b>EcoScan</b>	TNO Industrial Technology	Países bajos	Puede utilizarse por encargados y técnicos responsables de la implementación del ecodiseño de productos. Disponible de varias bases de datos y su manejo es sencillo.
<b>Boustead</b>	Boustead Consulting	Reino unido	Herramienta muy completa indicada para realizar estudios ACV dentro de la industria química, plásticos acero, etc.
<b>Gabi</b>	Universidad de Stuttgart	Alemania	Además de las posibilidades convencionales del ACV, permite asociar costes a los flujos y realizar análisis económicos.
<b>KCL Eco</b>	Finnish Pulp and Paper Research Institute	Finlandia	Presenta una interfaz gráfica muy completa. Posee el Eco 95 y destaca por sus datos de la industria papelera.
<b>LCAit</b>	ChalmersIndustritenik	Suecia	De aplicación principal en el sector de envases y productos de papel.
<b>Miet</b>	Universidad de Lieden	Países bajos	Trabaja con MS Excel y se basa en datos ambientales de EE.UU.
<b>Pems</b>	Pira International	Reino unido	Posee un interfaz gráfico flexible. Puede ser utilizado tanto por principiantes como por expertos en la materia.
<b>SimaPro</b>	Pré-cosultants	Países bajos	Permite realizar ACV completo con múltiples métodos de evaluación de impactos. Presenta completas y variadas bases de datos.
<b>TEAM</b>	Ecobilian	Francia	Herramienta muy completa, flexible y potente aunque más compleja de utilizar.
<b>Umberto</b>	Ifeulnstitute Hamburgo	Alemania	Ofrece datos de gran calidad y resultados transparentes. Las librerías de datos son completas y flexibles.
<b>Euklid</b>	Fraunhofer-Institute	Alemania	Programa orientado a estudios de ACV de productos industriales.
<b>Wisard</b>	Price water houseCoopers	Francia	Indicado para análisis de impacto económico y medioambiental de residuos sólidos municipales.

**Tabla 11.** Programas informáticos para estudios de ACV.

**Fuente:** Aranda 2008

El software SIMAPRO es el más utilizado en Latinoamérica para la elaboración de ACV. Esta herramienta informática dispone de bases de datos de procesos, materias primas combustibles, transportes, etc., que facilitan el diseño de escenarios para evaluar los IAP de procesos. Las bases de datos y la información registrada en el software son de carácter internacional.

En el software se encuentra la información organizada por sectores industriales a nivel mundial, cada sector cuenta con bases de datos de procesos y materiales propios para cada proceso.

En la **Tabla 12** se presenta la descripción de las bases de datos almacenadas en SIMAPRO para algunos sectores.

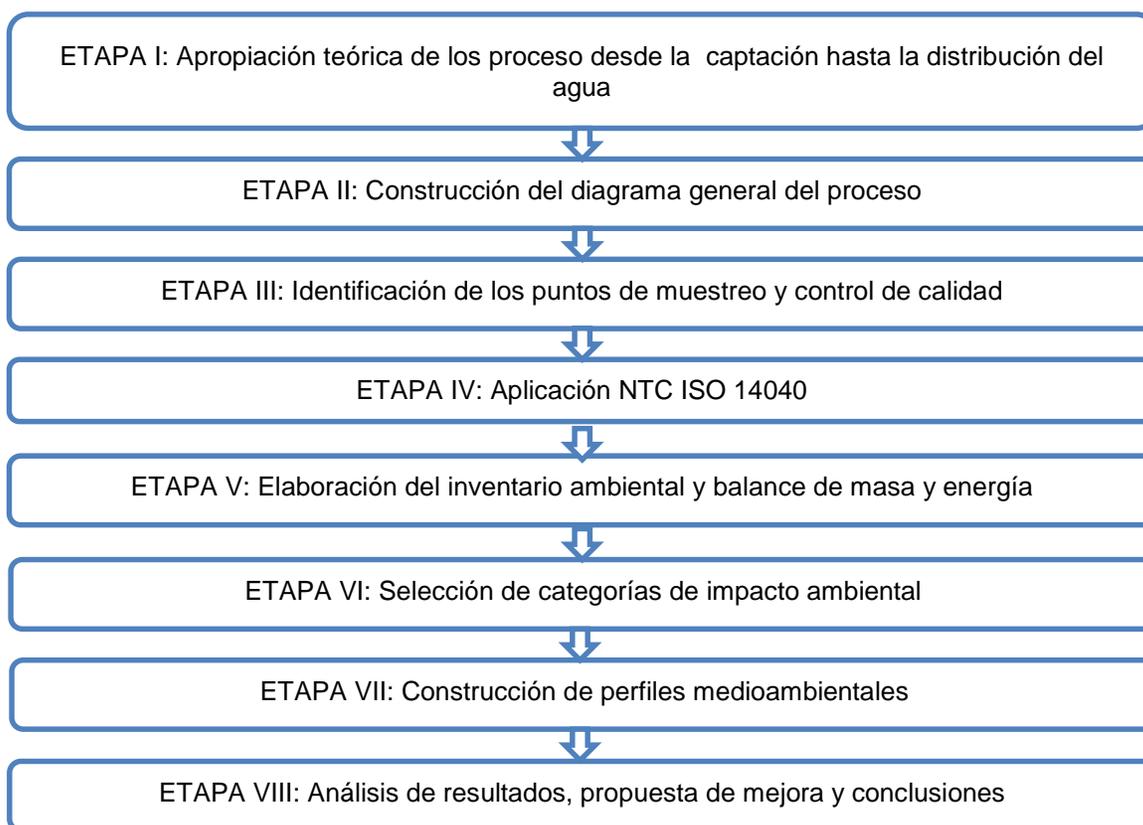
<b>Sector</b>	<b>Base de datos</b>
<b>Energía</b>	Carbón mineral Aceites Gas natural Energía nuclear Energía hidroeléctrica Energía eólica Energía fotovoltaica Energía calórica Suministro de electricidad y mezclas Sistemas CHP a pequeña escala Biocombustibles
<b>Materiales</b>	Materiales para construcción Metales Plásticos Papel y cartón
<b>Materias Primas Renovables</b>	Madera Madera tropical Fibras renovables

<b>Químicos</b>	Químicos básicos Solventes petroquímicos Detergentes
<b>Transporte</b>	Servicios de transporte
<b>Gestión De Residuos</b>	Tratamiento de residuos
<b>Agricultura</b>	Productos y procesos de agricultura
<b>Electrónica</b>	Productos y procesos de electrónica
<b>Ingeniería Mecánica</b>	Procesamiento de metales y aire comprimido

**Tabla 12.** Base de datos SIMAPRO.

### 3. METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología para el desarrollo del EIA del sistema de distribución de agua potable en el municipio de El Carmen de Bolívar. La **Figura 6** muestra el diagrama con las etapas metodológicas que se desarrollaron para la construcción de los perfiles medioambientales del sistema de estudio.



**Figura 6.** Etapas metodológicas aplicadas en el ACV.

Previa definición del objetivo del estudio, basado en la metodología establecida en la norma internacional UNE EN ISO 14040 versión 2006, se procedió a establecer

los límites del sistema y el número de evaluaciones utilizado. Así mismo, se definió la unidad funcional para tener una referencia con la cual relacionar las entradas y salidas al y del sistema. Se establecieron dos escenarios de trabajo para el ACV del suministro de agua potable desde el proceso de captación al proceso de distribución planteando como escenario 1 el actual sistema de operación y como escenario 2 se proyectan condiciones de operación futuras diseñadas por la empresa ACUECAR S.A. E.S., en conjunto con el consorcio Alianza YDN-Carmen, con el objetivo de optimizar la red de distribución y los procesos de operación. Las características de los dos escenarios se presentan en la siguiente tabla:

ESCENARIO 1	ESCENARIO 2
<p>a. Subproceso de captación: Operación de seis pozos denominados pozo No. 7, 8, 9, 13, A y B, con equipos eléctricos franklin electric de 10, 20 y 30 hp.</p> <p>b. Subproceso de conducción: Operación del sistema de conducción con impulsadoras marca Siemens de 200 hp y línea de conducción de 14 y 16 pulgadas en PVC RDE21.</p> <p>c. Subproceso de tratamiento: Potabilización de agua mediante el uso de hipoclorito de calcio granular al 70%.</p> <p>d. Subproceso de distribución: Operación con equipos eléctricos marca Siemens de 7.5 hp.</p>	<p>a. Subproceso de captación: Operación de seis pozos denominados pozo No. 7, 8, 9, 13, A y B, con equipos eléctricos franklin electric de 10, 20 y 30 hp.</p> <p>b. Subproceso de conducción: Operación del sistema de conducción con impulsadoras marca Weg de 250 hp y línea de conducción de 14 y 16 pulgadas en hierro dúctil.</p> <p>c. Subproceso de tratamiento: Potabilización de agua mediante el uso de cloro gaseoso en cilindros de 68 kilos.</p> <p>d. Subproceso de distribución: Operación con equipos eléctricos marca Weg de 40 hp.</p>

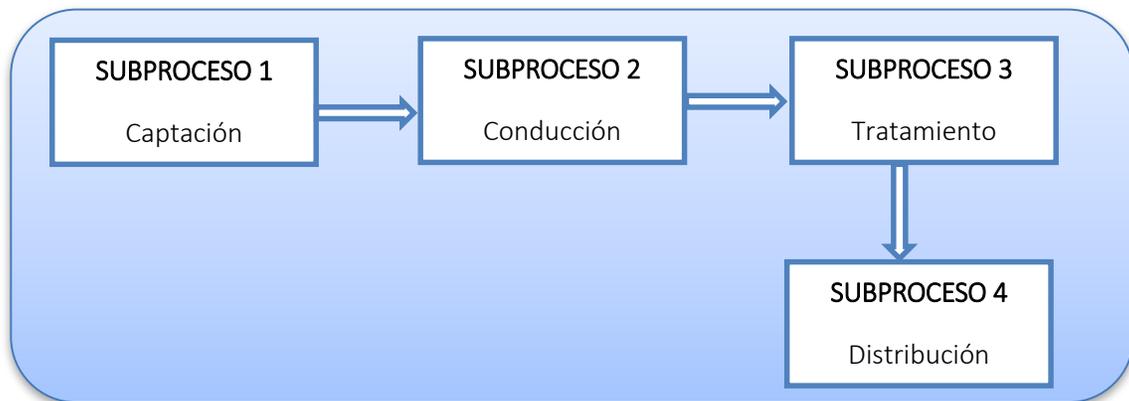
**Tabla 13.** Escenarios de trabajo para el ACV, (a) escenario actual, (b) escenario futuro.

**Fuente:** Autor

### 3.1. ETAPA I: APROPIACIÓN TEÓRICA DE LOS PROCESOS

Para el desarrollo de este estudio, se realizaron visitas técnicas a cada una de las estaciones que conforman el sistema de acueducto del Carmen de Bolívar, bajo la sigla de ACUECAR S.A. E.S.P., a fin de recopilar información fotográfica de los procesos involucrados en el sistema de suministro de agua, estableciendo cuatro subprocesos a los que se les determinaron las corrientes de entrada y salida tanto másicas como energéticas. Se procedió a diseñar el diagrama de operaciones de cada uno de los subprocesos que hacen parte del sistema de distribución. Se recopiló la información de planos record de cada uno de los sistemas que lo conforman, los cuales son: estación de rebombeo, estación de cámara de quiebre, estación de tratamiento y redes de distribución.

Los subprocesos involucrados en el proceso global de distribución de agua potable se presentan en la siguiente figura:

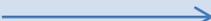
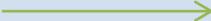


**Figura 7.** Subprocesos para la distribución de agua en el Municipio de El Carmen de Bolívar.

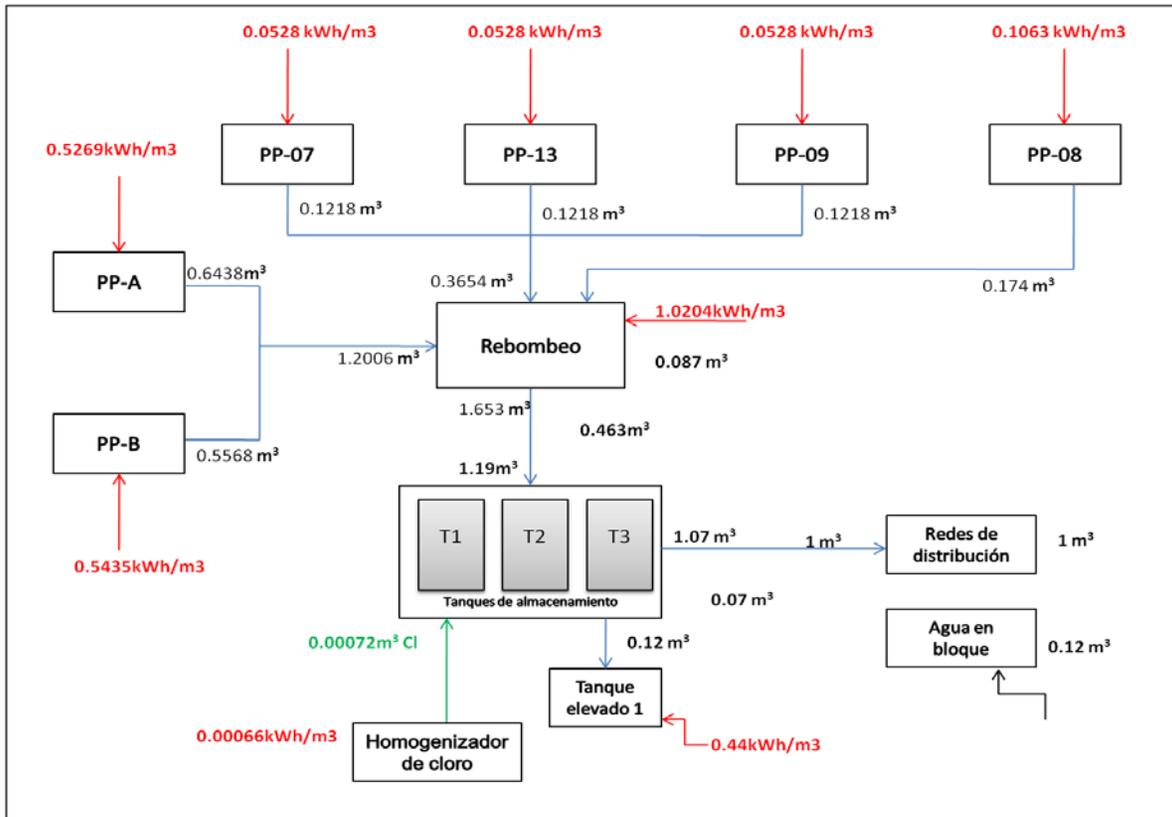
Para la elaboración de los balances másicos se calcularon las densidades de los flujos de proceso y para los balances energéticos se calcularon los consumos de energía eléctrica (kW/h) de cada uno de los equipos de bombeo.

### 3.2. ETAPA II: CONSTRUCCIÓN DIAGRAMA DEL PROCESO

Para la elaboración del diagrama del proceso se asignaron colores dependiendo del tipo de corriente con el fin de facilitar su diferenciación en cada una de las etapas, según lo indica la siguiente tabla y se evidencia en la **Figura 8**:

COLOR	TIPO DE CORRIENTE
	Agua potable
	Energía eléctrica
	Sustancias químicas
	Combustible fósil

**Tabla 14.** Identificación de tipo de corriente.  
**Fuente:** Autor



**Figura 8.** Balance de materia y energía.

### 3.3. ETAPA III: IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO Y CONTROL DE CALIDAD

Para los análisis de calidad realizados a muestras de agua cruda y agua tratada, se consultaron los diferentes ensayos de laboratorio llevados a cabo por laboratorios externos acreditados por el IDEAM y la ONAC (ver **Anexo D**, caracterización de aguas).

Se identificaron los respectivos puntos de muestreo ubicados dentro del casco urbano, estableciendo un total de seis puntos en los diferentes sectores de distribución de agua potable. Las muestras de agua cruda se realizaron en el campo de pozos a cada uno de los seis pozos activos. Los doce puntos de muestreo se representan en la siguiente tabla:

<b>Punto de muestreo</b>	<b>No. De puntos de muestreo</b>	<b>Ubicación</b>
<b>Sector 2 (a)</b>	1	Casco urbano
<b>Sector 3 (a)</b>	2	Casco urbano
<b>Sector 4 (a)</b>	1	Casco urbano
<b>Sector 5 (a)</b>	2	Casco urbano
<b>Pozo 7 (b)</b>	1	Ovejas
<b>Pozo 8 (b)</b>	1	Ovejas
<b>Pozo 9 (b)</b>	1	Ovejas
<b>Pozo 13 (b)</b>	1	Ovejas
<b>Pozo A (b)</b>	1	Piñal
<b>Pozo B (b)</b>	1	Piñal

**Tabla 15.** Puntos de muestreo de agua (a) tratada, (b) cruda.

**Fuente:** Autor

### **3.4. ETAPA IV: APLICACIÓN NTC ISO 14040.**

A continuación se describen los parámetros del ACV para el proceso de distribución de agua potable en el municipio de El Carmen de Bolívar, según la NTC ISO 14040.

#### **3.4.1. Definición del objetivo**

Llevar a cabo el estudio de ACV al sistema de suministro de agua de pozo profundo, mediante la utilización del software SIMAPRO, para determinar los impactos ambientales potenciales por etapas y globales bajo un análisis comparativo de dos escenarios alternativos de operación y proponer alternativas de mejora del sistema que contribuyan a la mitigación de los impactos ambientales asociados al proceso.

#### **3.4.2. Alcance del estudio**

Realizar el ACV al sistema de distribución de agua potable de la empresa de servicios públicos de acueducto y alcantarillado de El Carmen de Bolívar, vinculando en el estudio materiales de conducción, consumos energéticos y productos químicos, desde la extracción del agua hasta la distribución de la misma.

#### **3.4.3. Función del sistema bajo estudio**

El sistema bajo estudio realiza la actividad de suministro de agua subterránea.

#### **3.4.4. Unidad funcional**

La unidad funcional definida para este estudio fue de 1 m<sup>3</sup> de agua potable, que corresponden a una producción diaria de agua para una distribución y cobertura promedio de 5 habitantes por vivienda.

#### **3.4.5. Límites del sistema**

Se determinó como límites del sistema la disposición final de las aguas residuales generadas en las viviendas que conforman el casco urbano del municipio.

De esta forma el ACV realizado se categoriza como un estudio “De la Cuna a la Puerta”, que corresponde al interés de la empresa de Servicios Públicos de Acueducto y Alcantarillado de El Carmen de Bolívar (Acuecar S.A. E.S.P.), quien facilitó la información requerida para el presente estudio.

#### **3.4.6. Límites temporales**

Para efectos temporales del estudio, se contemplaron los datos históricos que posee la empresa Acuecar S.A. E.S.P., desde el 1 de septiembre de 2013 al 28 de febrero 2015.

#### **3.4.7. Etapas excluidas del análisis**

Para efectos de este análisis se excluyeron del sistema estudiado el flujo correspondiente a las siguientes corrientes:

- Transporte de insumos químicos a la planta de tratamiento de agua potable.
- Sustancias químicas utilizadas en los análisis de calidad realizados al agua cruda y tratada.
- Sustancias utilizadas en operaciones de mantenimiento de equipos de la estación de rebombeo y planta de tratamiento.
- Consumos energéticos generados por los tableros de control y las válvulas electrónicas Siemens de llenado de tanques de almacenamiento.
- No se consideran los impactos asociados a los accesorios en las redes hidráulicas.
- El sistema de cámara de quiebre debido a que esta etapa del proceso no involucra consumos eléctricos, reactivos o flujos.
- No se consideran los impactos asociados al transporte de materias primas (tubería para conducción de agua, químicos, equipos y herramientas)
- Se desprecia el efecto ambiental que tienen los bienes de capital (producción de maquinaria, equipos de procesamiento, obra civil de instalación de pozos y sistema de tuberías, edificios e instalaciones y ensamblaje de vehículos de transporte).

Establecidos los parámetros descritos anteriormente, se procede a construir los escenarios en SIMAPRO. Con los balances de masa se realiza el inventario de ciclo de vida (ICV), el cual relaciona el valor de las descargas con el factor de caracterización para cada uno de las categorías de impacto seleccionadas para cada una de las operaciones dentro del proceso. Con el ICV, se generan los gráficos de los perfiles medioambientales del sistema completo y por subproceso.

### **3.5. ETAPA V: ELABORACIÓN DEL INVENTARIO AMBIENTAL**

En esta etapa se presentan registrados los inventarios del ciclo de vida calculados para cada uno de los subprocesos que conforman el sistema de distribución de agua potable del municipio de El Carmen de Bolívar. Por medio de balances de masa y energía, registros de compras y estudios existentes en la empresa ACUECAR S.A. E.S.P., se procedió a cuantificar las entradas y salidas del sistema, recopilando información sobre el uso de recursos, descargas al aire, agua y suelo, asociados con el proceso de distribución de agua potable en el Municipio de el Carmen de Bolívar.

### **3.6. ETAPA VI: SELECCIÓN DE CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL**

La elección del sistema de tratamiento de agua está basada en limitaciones económicas y técnicas. Sin embargo, la industria de tratamiento de agua puede ser responsable de impactos ambientales significativos a nivel mundial. Entre los IA más común se encuentra el agotamiento de los recursos naturales y la liberación indirecta de contaminantes en el agua, la tierra y el aire a través de los productos químicos y el consumo de energía.

La **Tabla 16** presenta las categorías de impacto ambiental asociadas al estudio de los sistemas de tratamiento de aguas urbanas.

Referencia	Tipo de agua	Unidad Funcional*	Categorías de impacto ambiental
Sombekke et al.	Subterránea	1 m <sup>3</sup>	Calentamiento global Acidificación Nitrificación Ecotoxicidad acuática
Friedrich	Rio	1 m <sup>3</sup>	Calentamiento global Ecotoxicidad terrestre Ecotoxicidad acuática Toxicidad humana Eutrofización Acidificación Agotamiento de Ozono
Mohamed et al.	Ro	1 m <sup>3</sup>	Cambio climático Carcinógenos Ecotoxicidad Radiación Eutrofización Acidificación Combustible fósil Agotamiento de la capa de ozono Uso del suelo Contaminantes inorgánicos al aire Contaminantes inorgánicos al aire Agotamiento de minerales
Bonton et al.	Agua superficial	1 m <sup>3</sup>	Calentamiento global Carcinógenos Contaminantes inorgánicos respiratorios Contaminantes orgánicos respiratorios Radiación ionizante Agotamiento de la capa de ozono Ecotoxicidad acuática Ecotoxicidad terrestre Acidificación acuática Eutrofización acuática Extracción de minerales Energía no renovable Ocupación del suelo
Vince et al.	Subterránea	1 m <sup>3</sup>	Calentamiento global Toxicidad humana Acidificación terrestre Nitrificación terrestre

			Radiación ionizante Agotamiento de los recursos minerales Uso de energía no renovable Agotamiento de la capa de ozono
Tong et al.	Agua reciclada	1 m <sup>3</sup>	Acidificación Eutrofización Ecotoxicidad acuática Toxicidad humana Oxidación fotoquímica Agotamiento de la capa de ozono Ecotoxicidad terrestre

\*Agua tratada

**Tabla 16.** Categorías de impacto ambiental de sistemas de agua potable.

Teniendo en cuenta la información recopilada en la **Tabla 16**, se procedió a introducir los balances del sistema real y los escenarios alternativos en el software SimaPro, analizando las categorías de impacto establecidas en el método EDIP 2003. Las categorías de impacto analizadas fueron: categorías de impacto: calentamiento global, toxicidad humana en suelo, toxicidad humana en aire, Acidificación, Eutrofización acuática (N), Eutrofización terrestre, Formación de ozono por actividades humanas, Formación de ozono por vegetación.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. BALANCE DE MASA

El balance de masa se elaboró a partir de la información histórica suministrada por la empresa ACUECAR S.A. E.S.P para un periodo de 17 meses, de los cuales solo se tomaron los meses en los que el acueducto operó en condiciones normales (todas las unidades de operación en funcionamiento), descartando así los periodos donde los pozos estuvieron fuera de servicio. Se identificaron las corrientes de entrada y salida del proceso de suministro de agua potable, para lo cual se seleccionaron flujos volumétricos. Para el subproceso de conducción en los escenarios 1 y 2 no se modificaron las entradas y salidas de masa, como se presenta en la siguiente tabla:

BALANCE DE MASA (m <sup>3</sup> ), SISTEMA REBOMBEO					
Flujos	Escenario 1		Escenario 2		Descripción
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
F1	0.1218	-	0.1218	-	Agua captada Pozo 7
F2	0.1218	-	0.1218	-	Agua captada Pozo 13
F3	0.1218	-	0.1218	-	Agua captada Pozo 9
F4	0.174	-	0.174	-	Agua captada Pozo 8
F5	0.6438	-	0.6438	-	Agua captada Pozo A
F6	0.5568	-	0.5568	-	Agua captada Pozo B
F7	-	0.087	-	0.087	Pérdidas de agua cruda
F8	-	1.653	-	1.653	Agua cruda estación de bombeo
TOTAL	1.740	1.740	1.740	1.740	

**Tabla 17.** Balance de masa para el proceso de bombeo.

**Fuente:** Autor

Las entradas y salidas de masa correspondientes al subproceso de tratamiento de agua tiene en cuenta la consideración para el escenario 2, donde se plantea una alternativa de desinfección con cloro gaseoso, generando variación en la corriente 11, como se presenta en la siguiente tabla:

BALANCE DE MASA (m <sup>3</sup> ), SISTEMA DE TRATAMIENTO					
Flujos	Escenario 1		Escenario 2		Descripción
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
F10	1.19	-	1.19	-	Agua cruda
F11	0.00072	-	0.0078	-	Insumos químicos
F12	-	0.12036	-	0.1239	Agua tratada
F13	-	1.07036	-	1.0739	Agua tratada
TOTAL	1.1907	1.1907	1.1978	1.1978	

**Tabla 18.** Inventario de corrientes de entradas y salidas de masa para el proceso de tratamiento. **Fuente:** Autor

En la **Tabla 19** se registran las corrientes de entrada y salida de masa para el proceso global de distribución de 1 m<sup>3</sup> de agua potable.

BALANCE DE MASA (m <sup>3</sup> ), SISTEMA GLOBAL DE DISTRIBUCIÓN					
Flujos	Escenario 1		Escenario 2		Descripción
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
1	0.1218	-	0.1218	-	Agua cruda Pozo 7
2	0.1218	-	0.1218	-	Agua cruda Pozo 13
3	0.1218	-	0.1218	-	Agua cruda Pozo 9
4	0.174	-	0.174	-	Agua cruda Pozo 8
5	0.6438	-	0.6438	-	Agua cruda Pozo A
6	0.5568	-	0.5568	-	Agua cruda Pozo B
11	0.0007	-	0.0078	-	Pérdidas de agua cruda

7	-	0.0870	-	0.0870	Pérdidas de agua cruda
9	-	0.463	-	0.463	Pérdidas de agua cruda
12		0.122715		0.12358	Agua tratada en bloque
14	-	1.0013575	-	1.00179	Agua tratada en redes
15		0.0713575		0.07179	Perdida de agua tratada en redes
TOTAL	1.74543	1.74543	1.74716	1.74716	

**Tabla 19.** Balance de masa global para el sistema de distribución de agua potable.

**Fuente:** Autor

## 4.2. BALANCE DE ENERGÍA

La realización de los balances de energía del sistema, se llevó a cabo mediante la caracterización de los equipos eléctricos involucrados en cada uno de los procesos, los cuales operan en un rango entre 220 y 440 voltios, registrando los tiempos de operación promedio para cada uno de ellos. En la **Tabla 20** se presenta el listado de los equipos para cada uno de los escenarios de estudio.

MARCA	PROCESO	ESCENARIO 1 <sup>(a)</sup>		ESCENARIO 2 <sup>(b)</sup>	
		CONSUMO (kWh)	CANTIDAD	CONSUMO (kWh)	CANTIDAD
FRANKLIN ELECTRI	CAPTACIÓN	15	2	15	2
FRANKLIN ELECTRI	CAPTACIÓN	22	1	22	1
FRANKLIN ELECTRI	CAPTACIÓN	7.5	1	7.5	1
FRANKLIN ELECTRI	CAPTACIÓN	185	2	185	2
SIEMENS	IMPULSIÓN	100	2	-	-
WEG	IMPULSIÓN	-	-	150	3
SIEMENS	DISTRIBUCIÓN	5.6	2	5.6	2
PAFER	CLORACIÓN	0.37	1	-	-

PEDROLLO	CLORACIÓN	-	-	2.2	1
TOTAL		11		13	

**Tabla 20.** Equipos eléctricos asociados al proceso de distribución de agua potable, (a) escenario actual y (b) escenario futuro.

**Fuente:** Autor

En la **Tabla 21** se reportan las corrientes de entrada y salida de energía al proceso unitario de distribución de 1m<sup>3</sup> de agua potable.

BALANCE DE ENERGÍA (kWh), Para 1 m <sup>3</sup> Agua al Usuario					
Flujos	Escenario 1		Escenario 2		Descripción
	Consumo Energía Eléctrica	Pérdida Energía Trabajo	Consumo Energía Eléctrica	Pérdida Energía Trabajo	
E1	0.0528	-	0.0528	-	Energía eléctrica bomba pozo 7
E2	0.0528	-	0.0528	-	Energía eléctrica bomba pozo 13
E3	0.0528	-	0.0528	-	Energía eléctrica bomba pozo 9
E4	0.1063	-	0.1063	-	Energía eléctrica bomba pozo 8
E5	0.5269	-	0.5269	-	Energía eléctrica bomba pozo A
E6	0.5435	-	0.5435	-	Energía eléctrica bomba pozo B
E7	1.0204	-	0.7082	-	Energía eléctrica impulsadoras estación de rebombeo
E8	0.0008	-	0.0020	-	Energía eléctrica bomba químicos tratamiento de agua
E9	0.0528	-	0.0528	-	Energía eléctrica bomba tanque elevado
Trabajo	-	2.4091	-	2.0981	
TOTAL	2.4091	2.4091	2.0981	2.0981	

**Tabla 21.** Balance de energía para el sistema de distribución de agua potable.

**Fuente:** Autor

Para el proceso de distribución de agua se realizó el inventario de la tubería existente, teniendo en cuenta el tipo de tubería y los datos de las fichas técnicas se calculó el peso en kilogramos como se indica en la **Tabla 22**.

TUBERÍA RED DE DISTRIBUCIÓN ACUECAR S.A. E.S.P.		
Diámetro	PVC RDE 26	HIERRO DÚCTIL
	kg	kg
3	84607.6	542430.3
4	96015.0	529008.0
6	67232.0	347529.3
8	107079.9	427014.8
10	28221.1	167555.5
12	37520.0	127536.0
14	675360.0	2198400.0
16	399006.3	1337790.2
18	455994.0	1527624.0
TOTAL	1951035.8	7204888.1

**Tabla 22.** Inventario de tubería para el sistema de distribución de agua.  
Fuente: Autor

Se tomaron los consumos de energía eléctrica para el proceso de producción, construcción e instalación o mantenimiento de 1 m<sup>3</sup> de tubería en PVC y hierro dúctil (HD) respectivamente (AKHTAR, et al., 2014), con esta información se crea la corriente para la tubería en cada uno de los escenarios de estudio.

Con los valores de las entradas y salidas en cada uno de las etapas del proceso productivo y saneamiento, se procedió a alimentar los datos en SimaPro y de esta forma obtener los perfiles medioambientales global y por etapas para el proceso

de distribución de agua potable teniendo en cuenta las consideraciones para los escenarios 1 y 2.

Una vez introducidos los datos obtenidos en el software SimaPro, se procedió a la generación de las tablas y gráficas de análisis de los inventarios generados por el proceso de distribución de agua potable en el municipio de El Carmen de Bolívar, aplicando el método de análisis EDIP 2003.

Para llevar a cabo el presente trabajo se desarrollaron los siguientes casos de estudio como se presentan en la siguiente tabla:

Corrientes							
Caso	Escenario	Energía eléctrica	Insumos químicos	Tubería		Distribución	
Caso 1	Escenario 1-1	Energía eléctrica colombiana	Hipoclorito de calcio 70% granular	PVC pipe E Industry data 2,0	Transporte de tubería Truck B250 BUWAL250	Carro tanques	Transporte de tubería Truck B250 BUWAL250
	Escenario 2-1	Energía eléctrica colombiana	Cloro gaseoso	Cast iron, at plant/RER U, Ecoinvent unit processes*	Transporte de tubería Truck B250 BUWAL250	Carro tanques	Transporte de tubería Truck B250 BUWAL250
Caso 2	Escenario 1-2	Energía eléctrica colombiana	Hipoclorito de calcio 70% granular	PVC	-	Carro tanques	Transporte de tubería Truck B250 BUWAL250
	Escenario 2-2	Energía eléctrica colombiana	Cloro gaseoso	HD	-	Carro tanques	Transporte de tubería Truck B250 BUWAL250
Caso 3	Escenario 1-3	Energía eléctrica colombiana	Hipoclorito de calcio 70% granular	PVC	-	Redes hidráulicas	-
	Escenario 2-3	Energía eléctrica colombiana	Cloro gaseoso	HD	-	Redes hidráulicas	-
Caso 4	Escenario 1-4	Energía eléctrica colombiana	Hipoclorito de calcio 70% granular	PVC	-	Redes hidráulicas	-
	Escenario 2-4	Energía eléctrica colombiana	Cloro gaseoso	HD	-	Redes hidráulicas	-

	Escenario 3-4	Energía eléctrica colombiana	Cloro gaseoso	PVC- Orientado	-	Redes hidráulicas	-
--	------------------	---------------------------------	------------------	-------------------	---	----------------------	---

**Tabla 23.** Casos para ACV en red de distribución de agua potable

**Fuente:** Autor

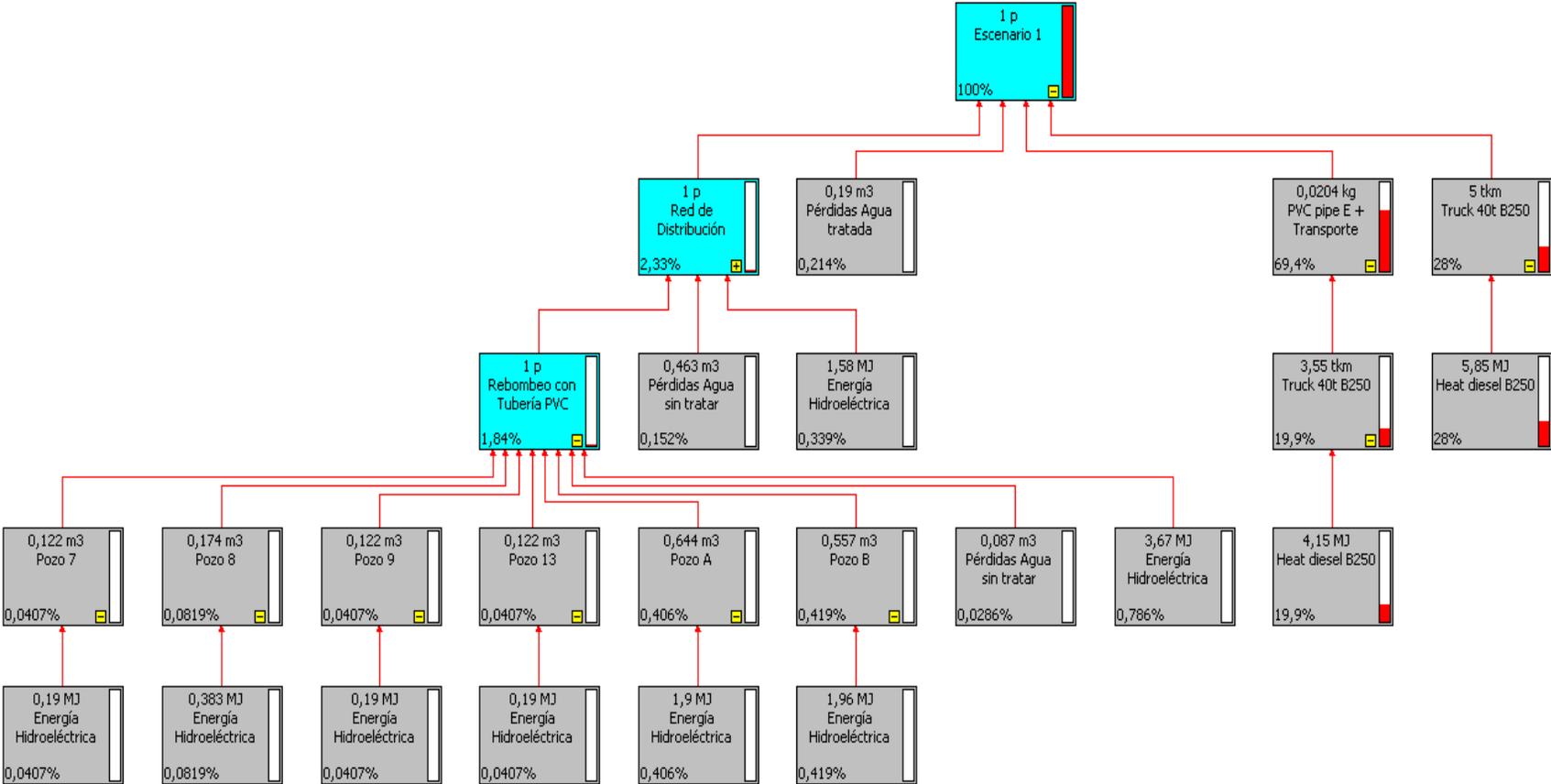
#### 4.3. CASO DE ESTUDIO 1

En la **Figura 9** se presenta el árbol de proceso global obtenido para el escenario 1 planteado en el caso 1 de estudio. Para la producción de la tubería se tiene en cuenta el proceso del PVC pipe E tomado de la base de datos Industry data 2.0y asociando el transporte de la misma en una Truck 40t B250 de la bases de datos Duwal 250, considerando así todos los procesos involucrados en la producción, transporte y mantenimiento de tubería (procesos obtenidos del software SimaPro). Para el escenario 2 con tubería en hierro dúctil, se tomó la corriente Cast iron, at plant/RER U, de la base de datos Ecoinvent unit processes de SimaPro.

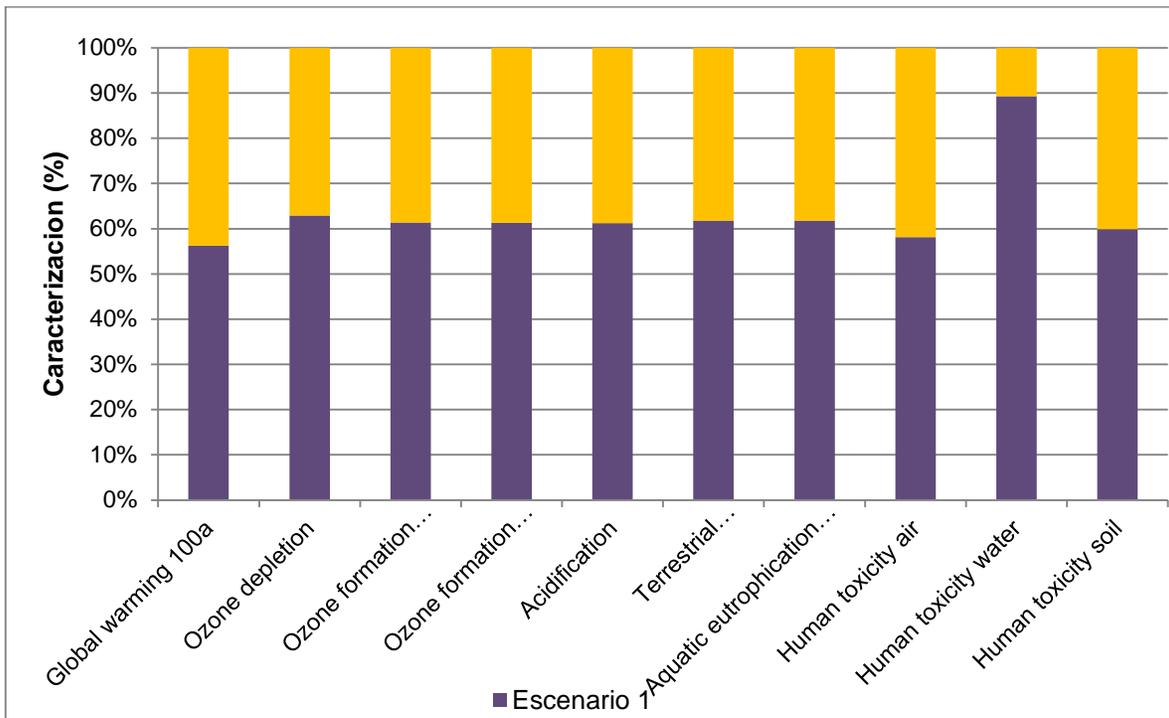
De la **Figura 9** se observa que el 69.4% de la carga ambiental corresponde a productos o servicios externos requeridos por la empresa y suministrados por terceros así: producción de tubería (49.5%) y transporte de la tubería (19.9%), desde puerto Barranquilla a la planta de acopio de Acuecar S.A.

El 2.54% de las cargas ambientales están asociadas a los subprocesos realizados por la empresa ACUECAR S.A., para el proceso de distribución de agua potable, sobre los cuales se puede tener incidencia o control directo por parte de la compañía. El 28% restante de las cargas están asociados al transporte involucrado en el proceso de distribución de agua en bloque (carro tanques).

**Figura 9.** Árbol de proceso para la distribución de agua realizada por Acuecar S.A. con corte de visualización al 0.037% para el caso 1 escenario 1.



En la siguiente figura se muestran los perfiles medioambientales del proceso de distribución de agua potable para el caso de estudio 1.



**Figura 10.** Caracterización de impactos ambientales globales Caso de estudio 1.

**Fuente:** Método EDIP 2003

En la **Figura 10**, se presentan los IAP de los escenarios de estudio para el sistema de distribución de agua potable en El Carmen de Bolívar para el caso 1, en la cual se aprecia que las categorías de impacto de Calentamiento global, formación de ozono, acidificación, toxicidad para el ser humano en aire, agua y suelo, eutrofización terrestre y acuática, presentan un impacto elevado asociado al proceso de distribución para el escenario 1 en comparación al escenario 2, debido a las cargas ambientales de los subproceso pertenecientes a la producción de tubería y las emisiones relacionadas a la combustión durante el transporte de la misma (ver **Anexo E**).

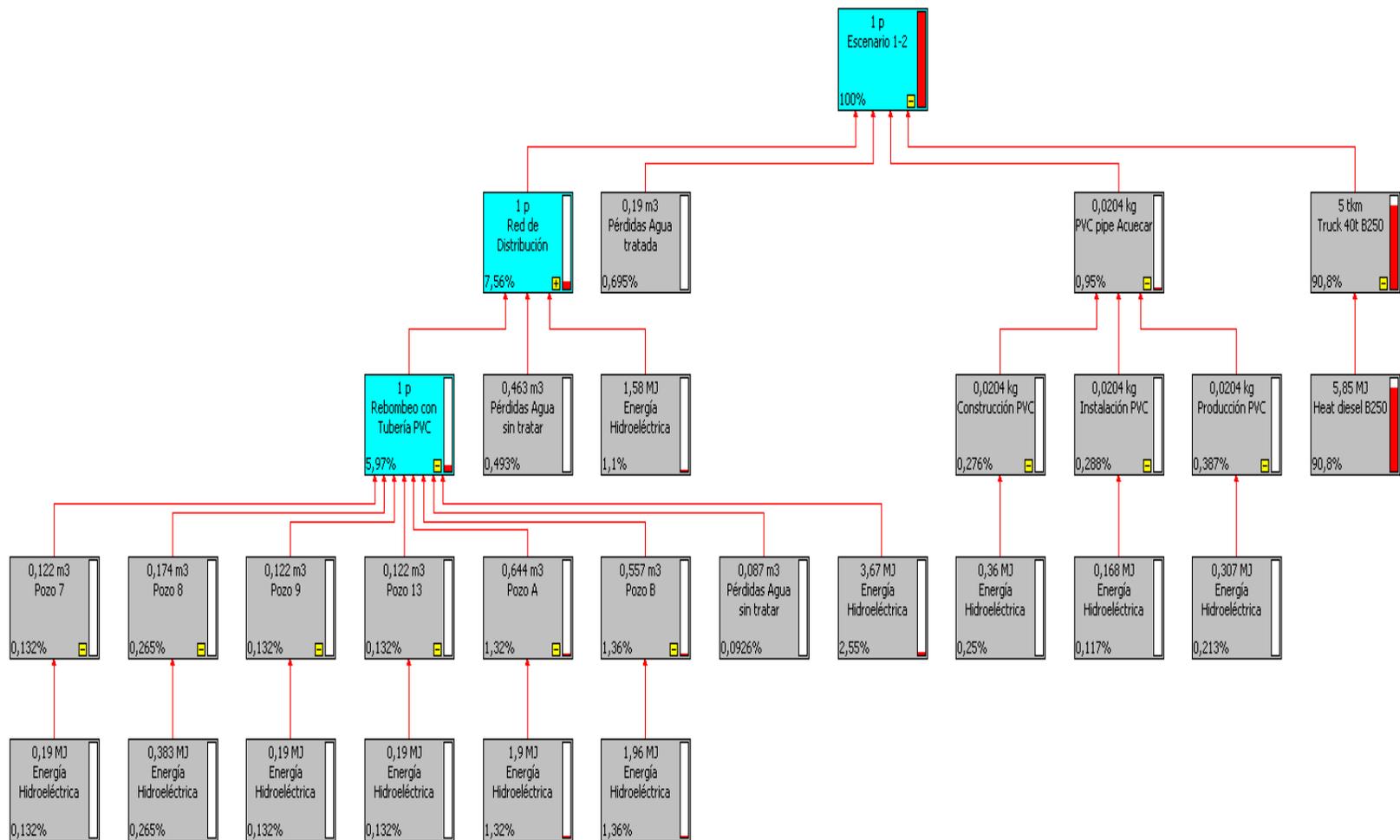
Para los productos o servicios externos, sobre los cuales no tenemos control directo, en términos de aportar menor carga ambiental, debido a la implicación de todo el proceso productivo de la tubería, se podrían disminuir las cargas asociadas a las emisiones por uso de combustible en el transporte de materias primas, con proveedores ubicados más cerca de El Carmen de Bolívar, lo que llevaría a una disminución del uso de combustibles en los vehículos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió evaluar los impactos ambientales de los subprocesos de captación, conducción, tratamiento y distribución de agua potable, teniendo en cuenta solo las emisiones generadas por el desgaste de la tubería de PVC y HD, creando una nueva corriente para la tubería, tomando los inventarios realizador en el estudio propuesto por Akhtar et al., 2014, con el fin de conocer las contribuciones ambientales de estos procesos de manera separada de los procesos y servicios externos (consumos y procesos involucrados en la producción de la tubería y transporte de la misma), para lo cual se procede a realizar un análisis comparativo para los escenarios 1 y 2, planteando alternativas de estudio denominadas caso 2, 3 y 4, para llevar a cabo un análisis completo del sistema de distribución de agua en el municipio de El Carmen de Bolívar.

#### **4.4. CASO DE ESTUDIO 2**

En este caso de estudio se crea la corriente para el proceso de producción, construcción, mantenimiento y terminación de tubería en PVC y HD (AKHTAR, et al., 2014), para cada escenario, a fin de relacionar solo la energía eléctrica consumida en los procesos de producción de tubería y los impactos ambientales asociados a la distribución de un 1 m<sup>3</sup> de agua en bloque para lo cual solo se toma la corriente asociada al transporte de agua en carro tanques dentro del municipio, debido a que el objetivo de este estudio es el análisis de los impactos ambientales generados por el sistema de distribución de agua, cuyo árbol de proceso para el escenario 1 se muestra en la **Figura 11**.

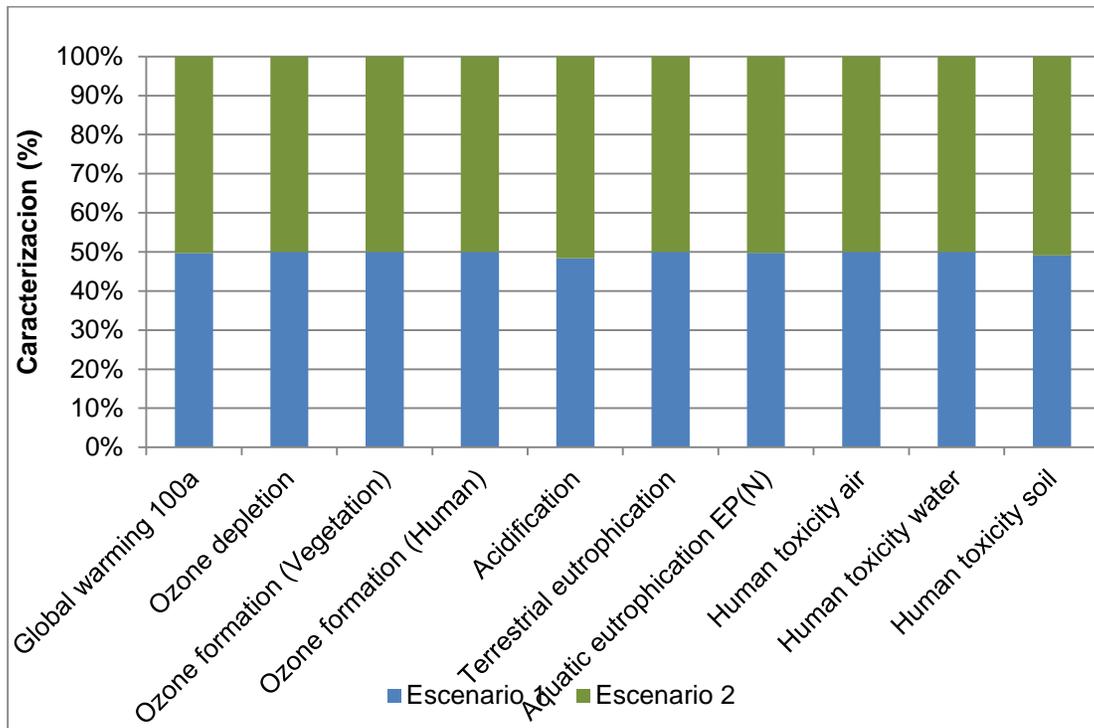
**Figura 11.** Árbol de proceso para la distribución de agua realizada por Acuecar S.A. con corte de visualización al 0.037% para el caso 2 escenario 1.



De los valores de la figura anterior se observa que el subproceso de distribución en redes aporta un 7.56% de la contribución total, la cual está relacionada con el subproceso de rebombeo, pérdidas de agua y consumos energéticos. El porcentaje de pérdidas en la red de distribución de agua potable es del 0.695% de la contribución total, lo cual no representa un impacto ambiental significativo al proceso total de distribución. Este valor esta atribuido en su totalidad a pérdidas de agua por fugas en la redes.

Las mayores cargas ambientales corresponden al proceso de transporte de agua en carro tanques con el 90.8% de las carga totales del proceso realizado por Acuecar S.A. Esta etapa se ve afectada por el uso de combustible para cada desplazamiento. La producción de tubería de PVC aporta un 0.95% de la contribución total, debido al consumo de energía en los procesos de producción, construcción e instalación de toda la tubería del sistema de acueducto. Teniendo en cuenta lo anterior se genera un análisis del escenario 2 en el cual se plantea una nueva corriente para la tubería denominada tubería en hierro dúctil (HD). La totalidad de las sustancias aportadas por cada uno de los procesos de distribución de agua potable a las categorías de impacto ambiental analizadas se presentan en el **Anexo C**.

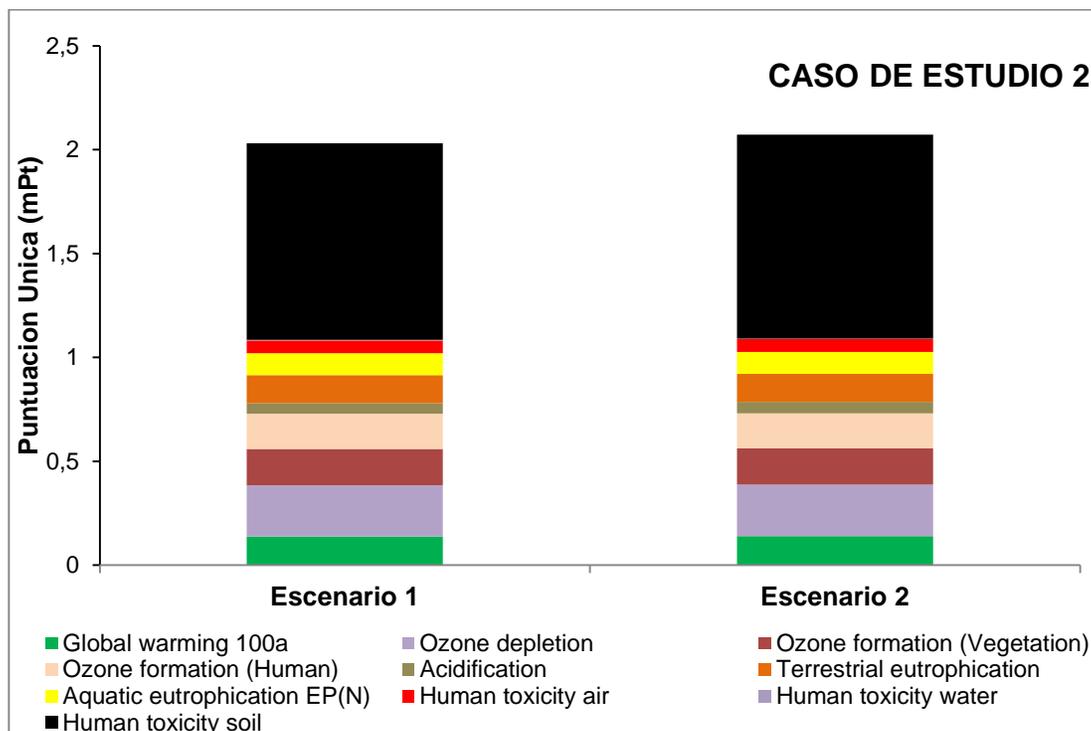
En la **Figura 12** se presentan los IAP de los escenarios 1 y 2 para el sistema de distribución de agua potable caso de estudio 2, en el cual se aprecia que los dos escenarios presentan porcentajes similares para cada una de las categorías de impacto evaluadas (ver **Anexo E**).



**Figura 12.**Caracterización de impactos ambientales globales Caso de estudio 2.

**Fuente:** Método EDIP 2003

La **Figura 13** muestra el aporte de cada escenario al impacto ambiental potencial y la discriminación de ese aporte en categorías de impacto ambiental, en donde se puede observar que las categorías de impacto más relevantes para el presente estudio son las de calentamiento global, formación de ozono por actividades humanas, eutrofización acuática (N), toxicidad humana al suelo, agotamiento del ozono, acidificación, toxicidad humana al aire, toxicidad humana al agua, formación de ozono (vegetal), eutrofización terrestre, teniendo los dos escenarios un aporte similar de los impactos en cada una de las categorías debido a que la contribución de la tubería de hierro dúctil aporta un 1.39 % de la contribución total con un 0.44% de contribución mayor en comparación a la tubería de PVC. El **Anexo E** presenta la información para el análisis de contribución del caso de estudio 2.



**Figura 13.** Análisis de contribución caso de estudio 2.

**Fuente:** Método EDIP 2003

La toxicidad humana al suelo es la categoría de mayor impacto debido al uso de combustible para el transporte de agua y las pérdidas de agua tratada con afectación debido al uso de insumo químicos para la potabilización.

#### 4.5. CASO DE ESTUDIO 3

Tomando en cuenta el análisis del caso de estudio 2, en el cual se observó que los escenarios de estudio presentan similitud en los impactos generados en cada categoría de impacto debido al uso de combustible para el transporte de agua en bloque o carro tanques, se procede a evaluar un tercer caso de estudio en el cual se toma la corriente creada para el proceso de producción, construcción, mantenimiento y terminación de tubería en PVC y HD para cada escenario y los

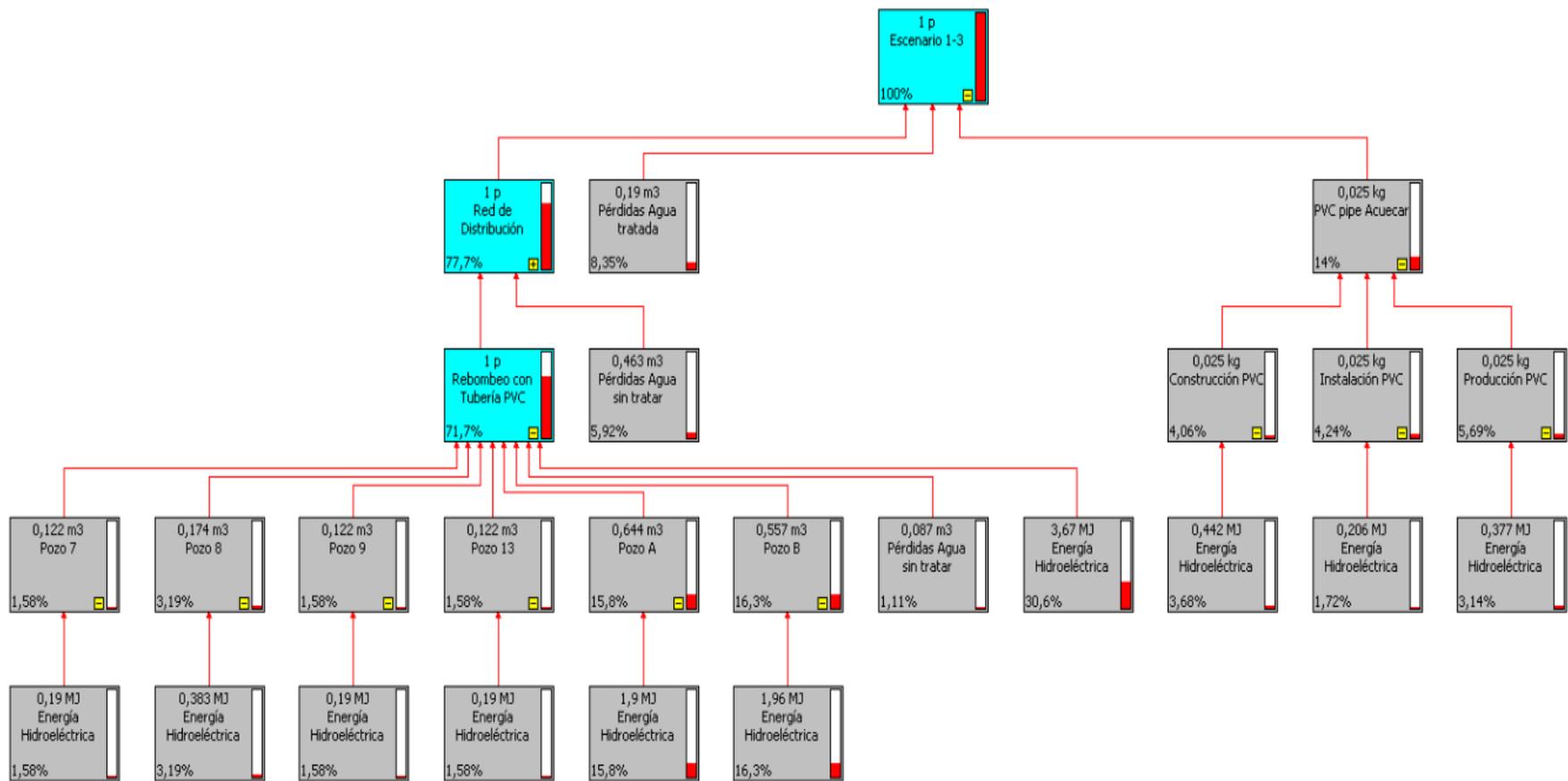
impactos ambientales asociados a la distribución de un 1 m<sup>3</sup> de agua a través de las redes hidráulicas de distribución de agua en el municipio. La **Tabla 24** reporta los valores porcentuales de la carga ambiental obtenidos en el árbol global de proceso para cada etapa (**Figura 14**).

MONTAJE	ETAPA	% CARGA AMBIENTAL	
		Escenario 1	Escenario 2
Red de distribución	Pozo 7	1,58	1,33
	Pozo 8	3,19	2,68
	Pozo 9	1,58	1,33
	Pozo 13	1,58	1,33
	Pozo A	15,8	13,3
	Pozo B	16,3	13,7
	Pérdidas de agua en captación	1,11	0,935
	Consumo energético rebombeo	30,6	17,9
	Pérdidas de agua en conducción	5,92	17,1
Tratamiento	Insumos químicos	0,0198*	7
	<b>Total</b>	<b>77,6798</b>	<b>76,605</b>
Pérdidas de agua tratada	Pérdidas de agua tratada	8,35	7,02
	<b>Total</b>	<b>8,35</b>	<b>7,02</b>
Tubería PVC	Construcción	4,06	0,63
	Instalación	4,24	0,658
	Producción	5,69	0,883
	<b>Total</b>	<b>13,99</b>	<b>2,17</b>
Tubería HD	Construcción	-	0,721
	Instalación	-	0,813
	Producción	-	12,7
	<b>Total</b>	<b>-</b>	<b>14,23</b>

\*El valor reportado indica que el porcentaje de contribución de esta etapa es menor al valor de corte considerado para el árbol de proceso mostrado, por tanto no se visualiza en la figura correspondiente.

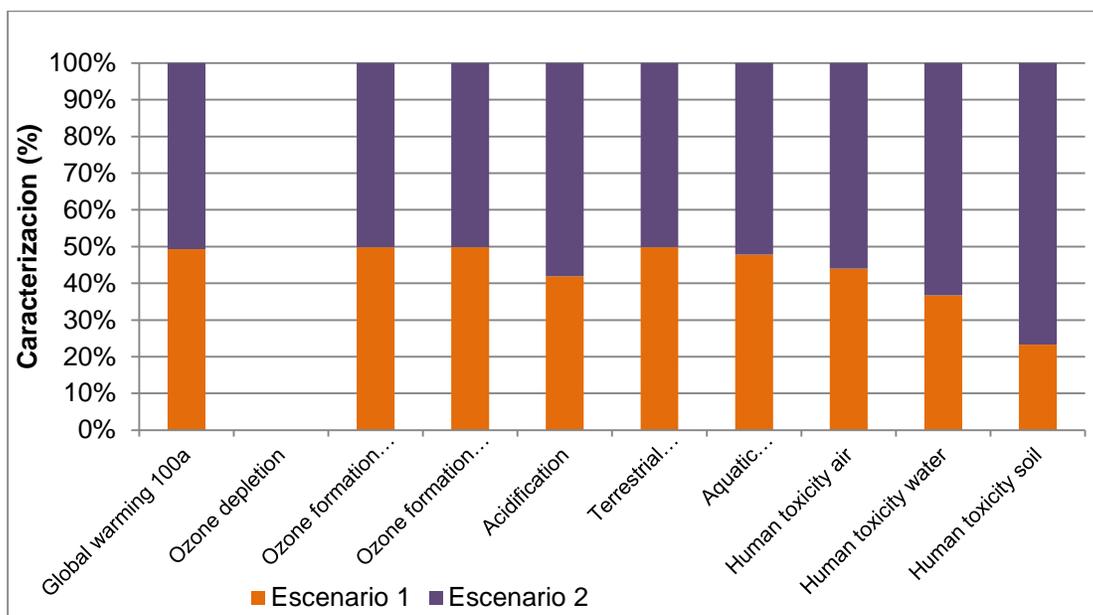
**Tabla 24.** Cargas ambientales del proceso general de distribución de agua potable caso de estudio 3.

**Figura 14.** Árbol de proceso para la distribución de agua realizada por Acuecar S.A. con corte de visualización al 0.037% para el caso 3 escenario 1.



A continuación se presentan los perfiles medioambientales para el sistema de distribución de agua potable caso de estudio 3.

En la **Figura 15**, se presentan los IAP de los escenarios 1 y 2, planteados en el caso de estudio 3 para el sistema de distribución de agua potable en el municipio de El Carmen de Bolívar, se aprecia que para la categoría de impacto: agotamiento de ozono la carga ambiental fue de cero debido a que para este caso de estudio no se considera ningún tipo de transporte el cual generó este impacto ambiental como se observó en el caso de estudio 2.



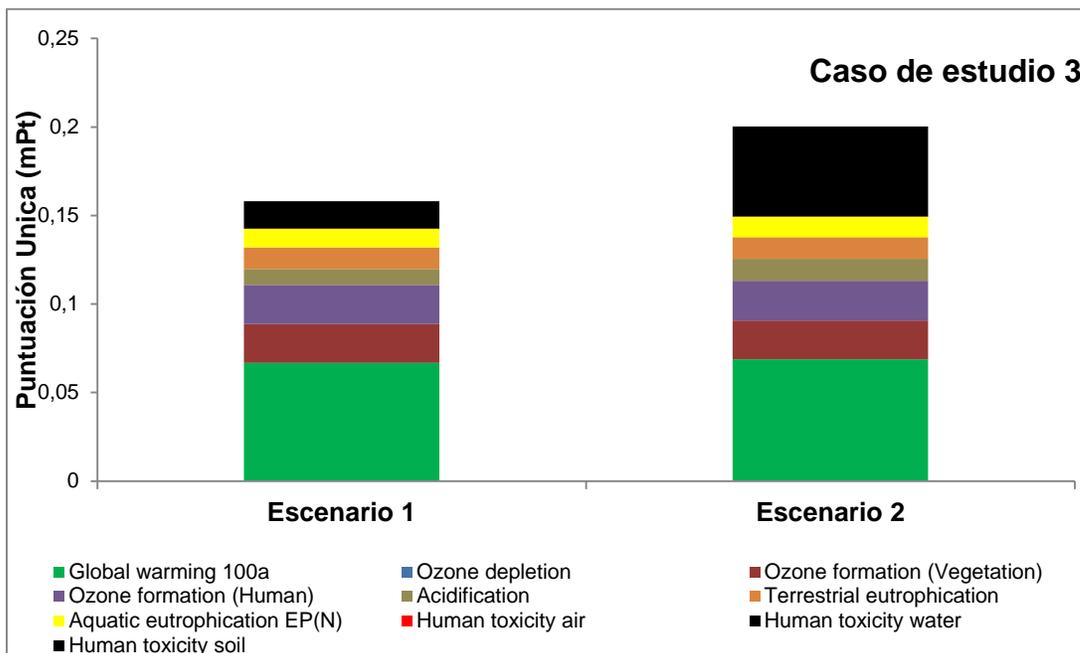
**Figura 15.** Caracterización de impactos ambientales globales Caso de estudio 3.

**Fuente:** Método EDIP 2003

Para las categorías de impacto de calentamiento global, formación de ozono por actividades humanas, eutrofización acuática (N), toxicidad humana al suelo, acidificación, toxicidad humana al aire, toxicidad humana al agua, formación de ozono (vegetal), eutrofización terrestre, presentan un impacto ambiental mayor

para el escenario 2 asociado al material de la tubería del sistema de distribución de agua (HD). Las tablas para el ICV del caso de estudio 3 se presentan en el **Anexo E**.

La **Figura 16** muestra el aporte de cada escenario al impacto ambiental potencial y la discriminación de este aporte en categorías de impacto ambiental, en donde se puede observar que las categorías de impacto seleccionadas para el presente estudio presentan un mayor impacto en el escenario 2, siendo la categoría de toxicidad humana en el agua la de mayor afectación debido al desgaste que sufre la tubería de HD a lo largo de su vida útil.

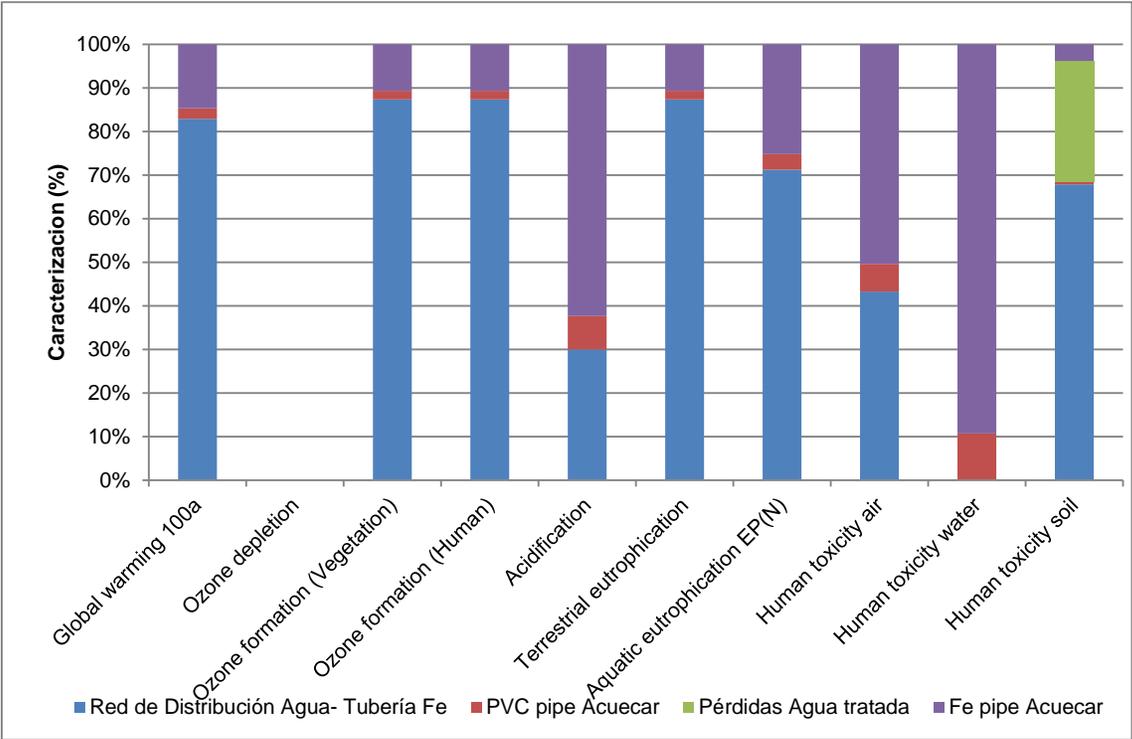


**Figura 16.** Análisis de contribución caso de estudio 3.

**Fuente:** Método EDIP 2003

Teniendo en cuenta que la empresa ACUECAR S.A., está incorporando a su operación de distribución de agua potable alternativas de mejora continua a fin de

disminuir los impactos ambientales asociados a sus procesos, se realizó un análisis completo al escenario 2 incorporado en el caso de estudio 3, analizando cada subproceso y categoría de impacto por separado, estableciendo un aporte para esta mejora continua. El análisis de contribución por subproceso en el escenario 2, para el ciclo de vida de estudio caso 3 y para las categorías de impacto ambiental identificadas como significativas se muestran en la **Figura 17** con un valor de corte de 0.26%. Las tablas del inventario del ciclo de vida (ICV) para las categorías de impacto ambiental evaluadas se encuentran en el **Anexo E**.



**Figura 17.** Perfil medioambiental para el proceso de distribución de agua potable escenario 2 caso de estudio 3.

**Fuente:** Método EDIP 2003

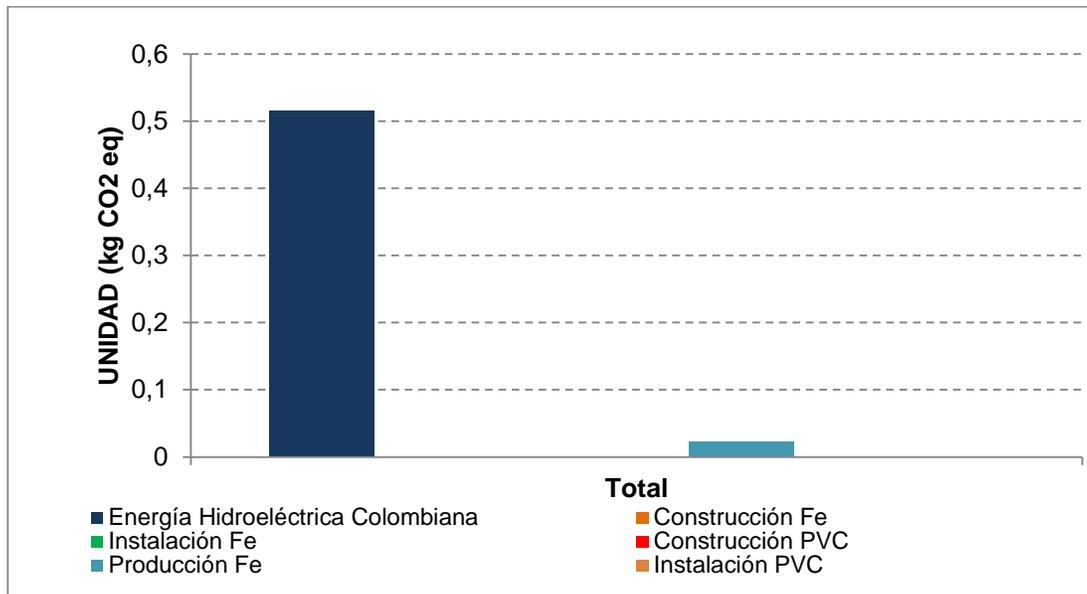
Se establece que el proceso de distribución de agua que tiene en cuenta los subprocesos de captación y conducción son los que mayor impacto ambiental aportan a cada una de las categorías de impacto seleccionadas. La contribución

de la tubería en PVC solo asocia el sistema de redes hidráulicas dentro del casco urbano, debido a que las redes de captación y conducción de agua cruda estas asociadas a un proceso en tubería de HD.

#### **4.6. PERFIL MEDIOAMBIENTAL DEL PROCESO DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN EL MUNICIPIO DE EL CARMEN DE BOLÍVAR.**

A continuación se analiza cada proceso y cada impacto por separado, para el escenario 2 propuesto en el caso de estudio 3 (denominado escenario 2-3), para lograr identificar las etapas de mayor impacto ambiental generado durante el proceso de distribución de agua potable por la empresa Acuecar S.A.

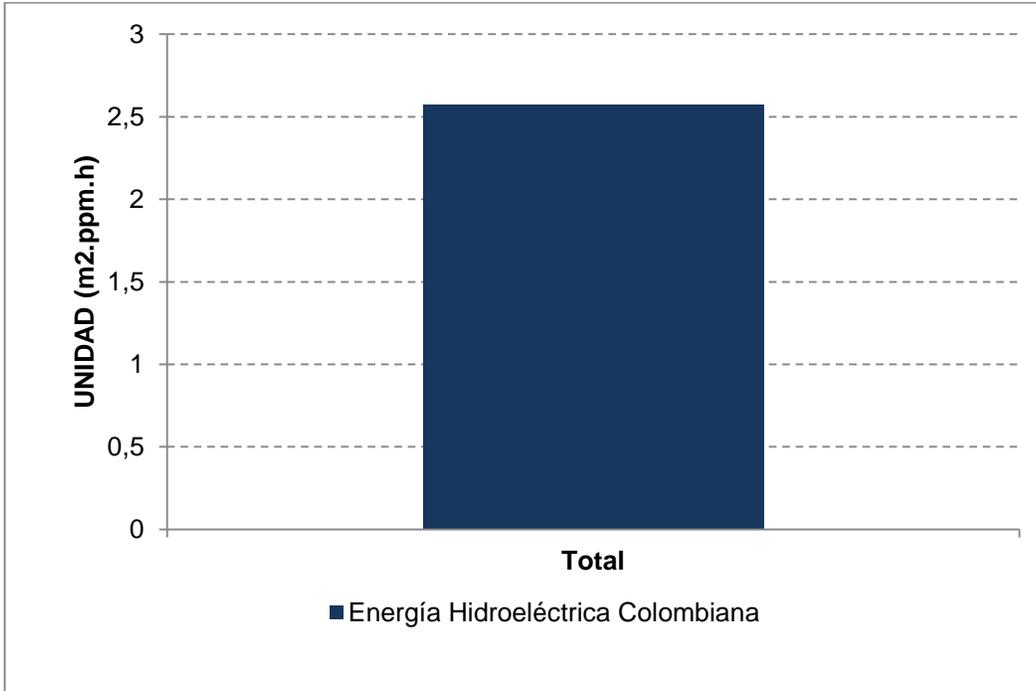
En la **Figura 18**, se evalúa la categoría de impacto ambiental para el calentamiento global, la cual se ve afectada por todas las etapas que componen el sistema, debido a que está asociado al consumo de energía eléctrica en cada una de ellas. Cabe anotar que el proceso de generación de energía eléctrica impacta no solo las categorías relacionadas con emisiones al aire sino también con las categorías del recurso agua (eutrofización acuática N), debido a que la corriente de energía eléctrica colombiana está dada principalmente por hidroeléctricas.



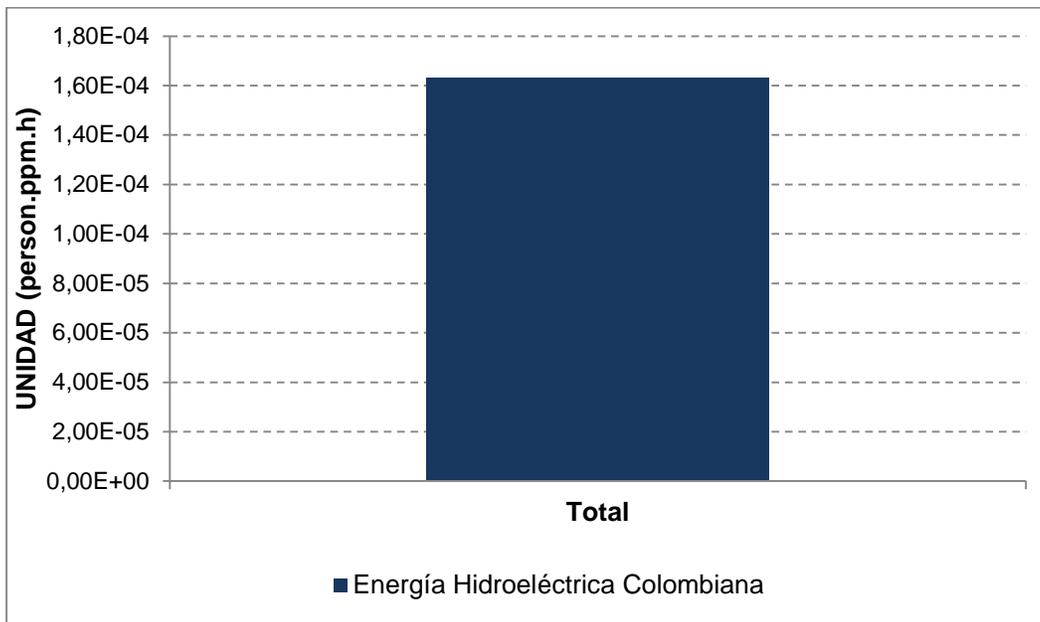
**Figura 18.** Perfil medioambiental para el calentamiento global escenario 2-3.

**Fuente:** Método EDIP 2003

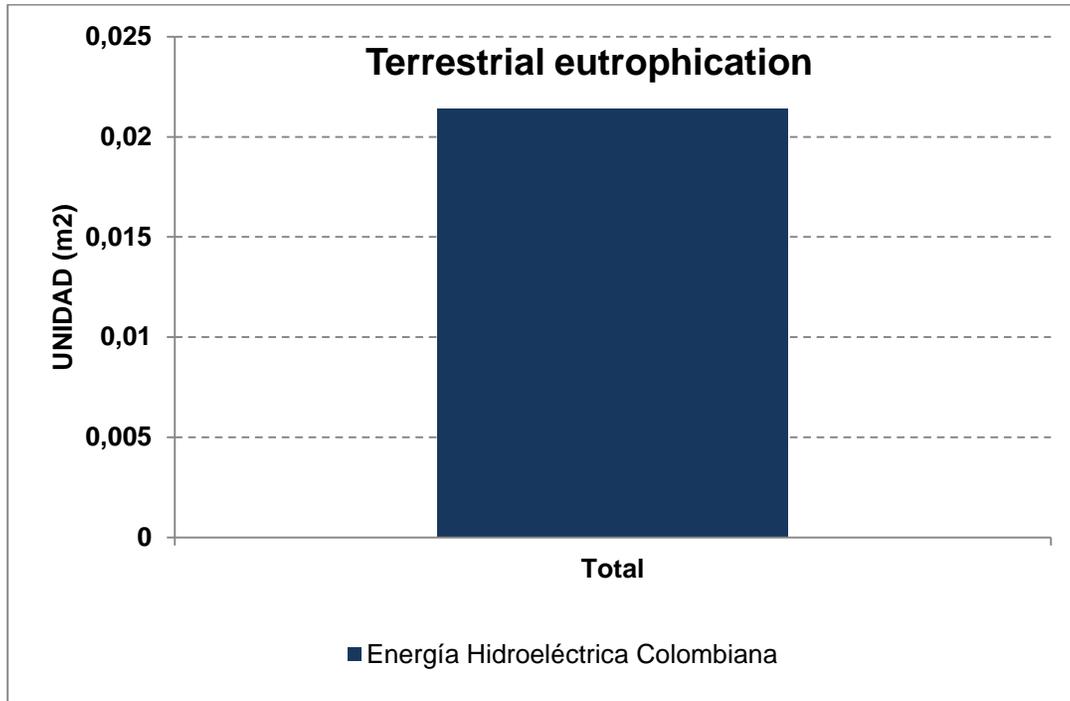
En las **Figura 19**, **Figura 20**, **Figura 21**, se presentan los perfiles medioambientales para las categorías de impacto formación de ozono por vegetación, formación de ozono por actividades humanas y eutrofización terrestre, asociadas en un 100% al consumo de energía eléctrica colombiana, desde el proceso de captación de agua y el transporte del efluente a la estación de rebombo y de esta a la planta de tratamiento. Se considera el impacto ambiental proveniente del uso de energía a causa de las emisiones de CO<sub>2</sub>, material particulado, CO y componente de óxidos de azufre, quienes son los principales contaminantes para estas categorías.



**Figura 19.** Perfil medioambiental para formación de ozono por vegetación escenario 2-3.  
Fuente: **Método EDIP 2003**

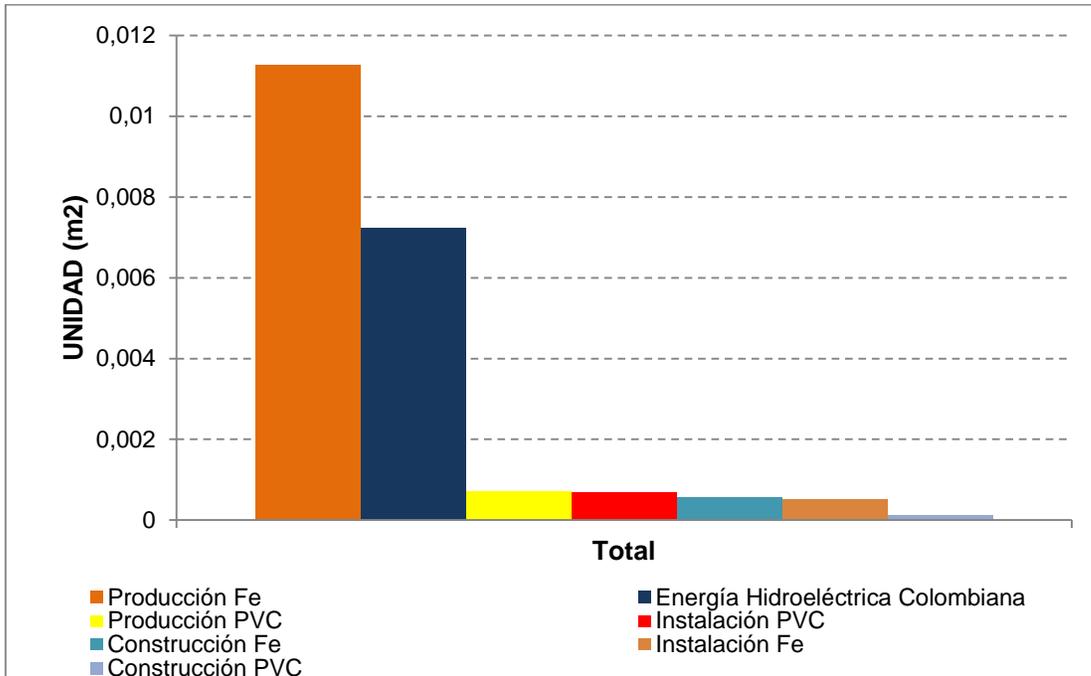


**Figura 20.** Perfil medioambiental para formación de ozono por actividades humanas escenario 2-3. **Fuente:** Método EDIP 2003



**Figura 21.** Perfil medioambiental para la eutrofización terrestre escenario 2-3. **Fuente:** Método EDIP 2003

La mayor contribución a la categoría de impacto para la acidificación como se muestra en la **Figura 22**, está representada por la emisión de óxidos de azufre (SOx) y por óxidos de nitrógenos (NOx), generados en el proceso de producción, construcción y mantenimiento de la tubería de HD y PVC siendo esta última la de menor contribución y las emisiones asociadas a la generación de la energía eléctrica colombiana requerida para llevar a cabo los procesos que implican un consumo de energía. Estas sustancias al estar presentes en el aire sufren un proceso de oxidación dando lugar a formación de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y HNO<sub>3</sub>, los cuales se disuelven en las gotas de agua que forman las nubes, retornando al suelo con las precipitaciones.



**Figura 22.** Perfil medioambiental para la acidificación escenario 2-3. **Fuente:** Método EDIP 2003

La generación de energía eléctrica impacta las categorías del recurso agua (eutrofización acuática N), debido a que la corriente de energía eléctrica colombiana está dada principalmente por hidroeléctricas, como se muestra en la **Figura 23**. Los impactos a esta categoría se atribuyen a la presencia de metano, óxidos de nitrógeno y azufre obtenidos en la producción de la energía eléctrica. Cabe anotar que también existe presencia de hidrocarburos en mínima cantidad.

La afectación principal en la categoría de toxicidad humanan en el aire se debe a las emisiones de CO<sub>2</sub>, monóxido de dinitrógeno, óxidos de nitrógeno y residuos de calor asociados en la generación de la energía eléctrica y a los diferentes dióxidos de carbono, nitrógeno y azufre emitidos en la producción de la tubería de hierro dúctil, determinados a través de la literatura ver **Figura 24**.

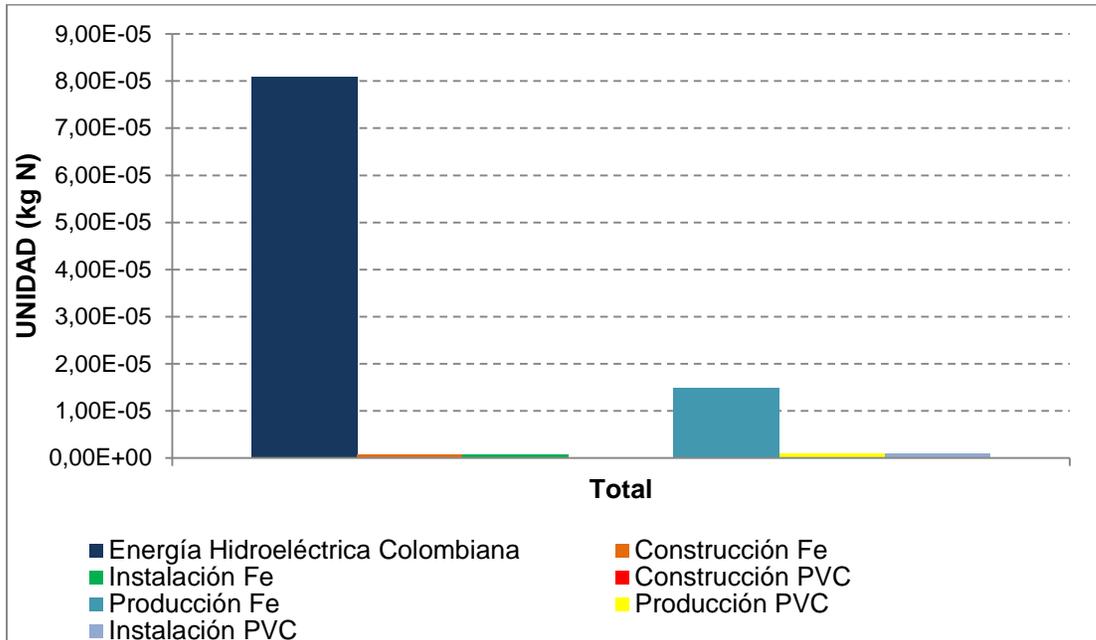


Figura 23. Perfil medioambiental para la eutrofización acuática (N). Fuente: Método EDIP 2003

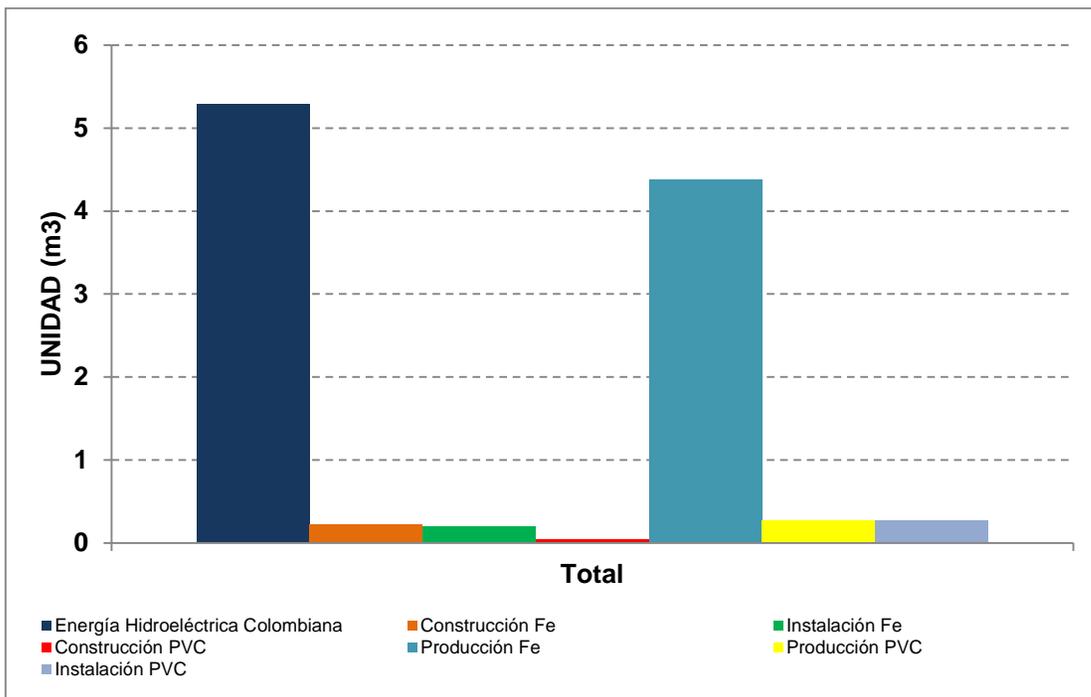
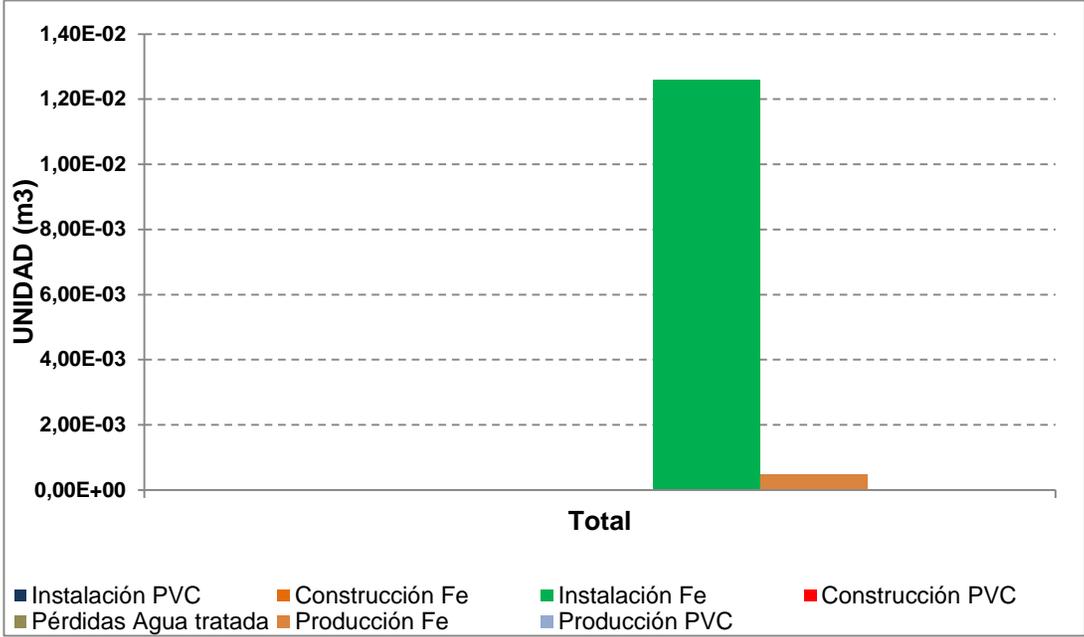


Figura 24. Perfil medioambiental para la toxicidad humana en aire. Fuente: Método EDIP 2003

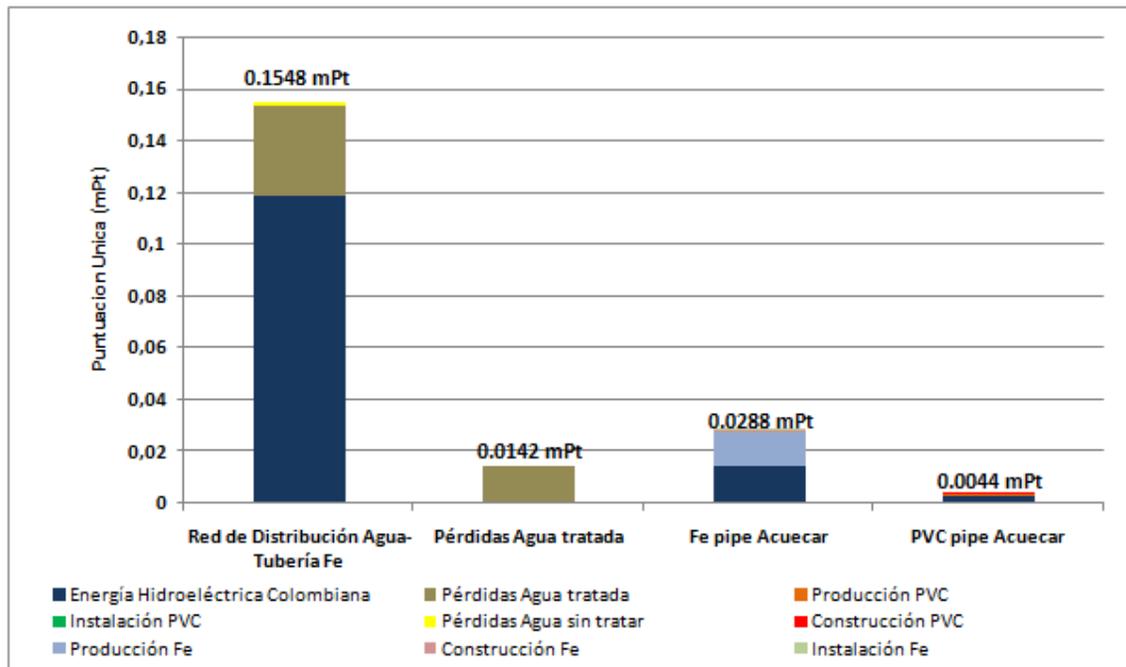
La categoría de toxicidad humana en el suelo obedece a las emisiones de dióxidos de nitrógeno y azufre generados en la etapa de construcción de la tubería de hierro dúctil y a los impactos asociados en la pérdida de agua tratada debido al contenido de compuestos clorados, nitritos y hierro, tal como se presenta en la siguiente figura:



**Figura 25.** Perfil medioambiental para la toxicidad humana en suelo. **Fuente:** Método EDIP 2003

En la **Figura 26** se presenta la contribución ambiental global (0.2022 mPt) por procesos en relación a la distribución del agua potable, de la cual se establece que la mayor parte del impacto se asocia a la red de distribución de agua potable, integrada por las etapas de captación, conducción y tratamiento, con una contribución del 77% (0.1548 mPt), seguido del proceso del uso de la tubería de hierro dúctil con una contribución del 14% (0.0288 mPt), procede el proceso de pérdidas de agua tratada al suelo en un 7% (0.0142 mPt) de la contribución

ambiental total, la diferencia del 2% (0.0044 mPt) obedece al desgaste de la tubería en PVC pertenecientes a las redes hidráulicas de distribución.

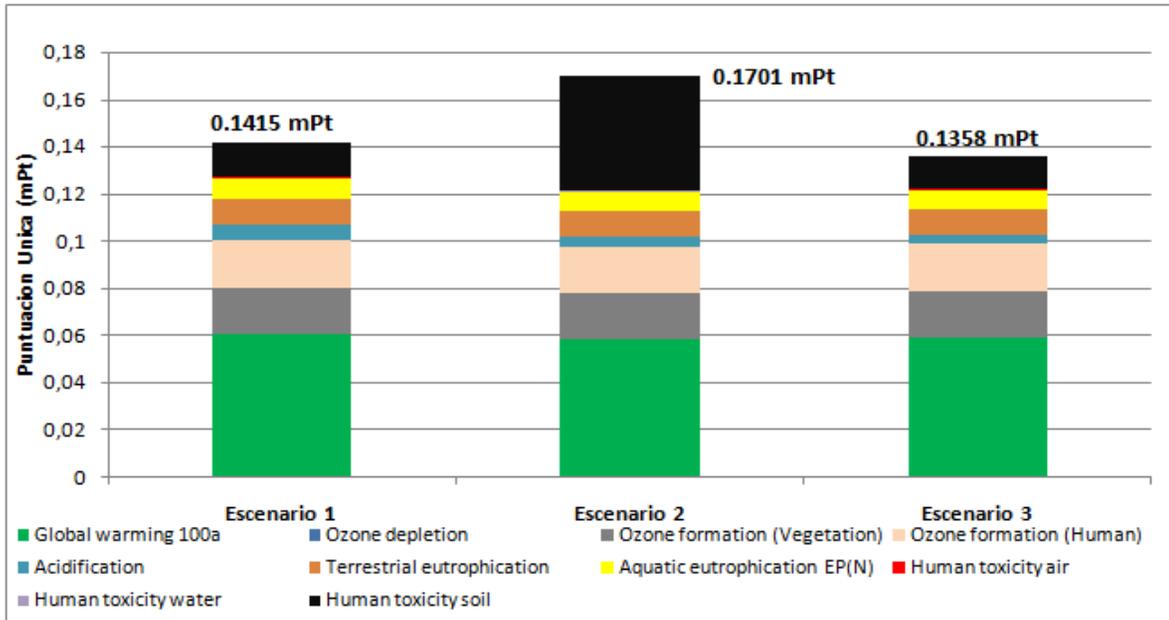


**Figura 26.** Contribución de Procesos (mPt) escenario 2-3. **Fuente:** Método EDIP 2003

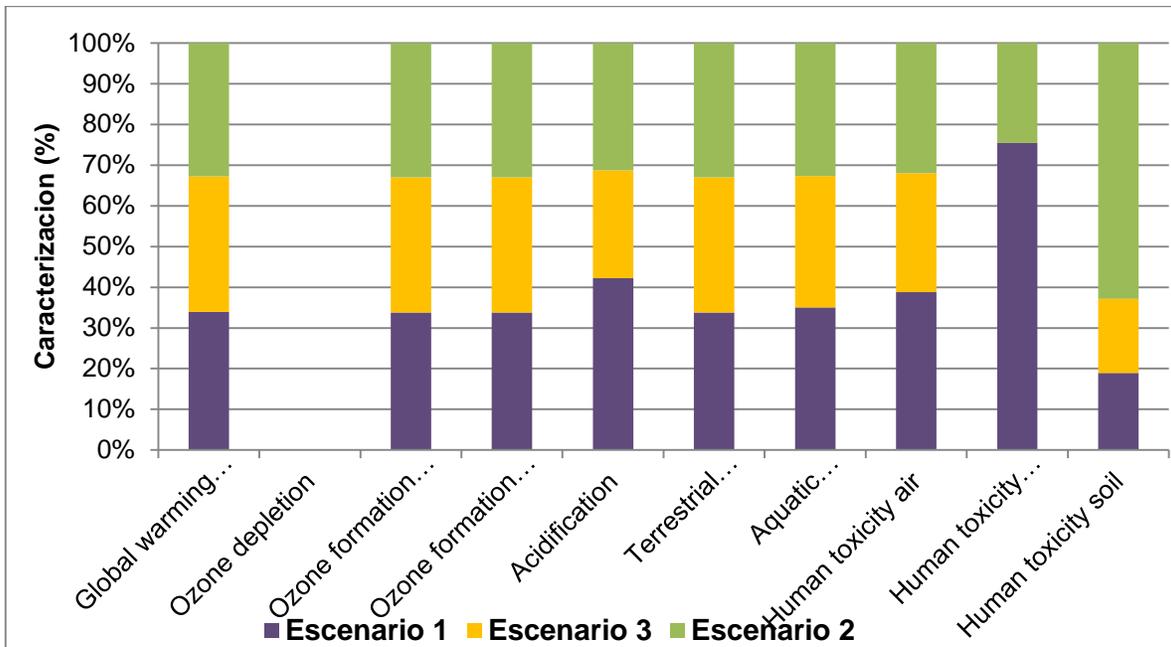
#### 4.7. CASO DE ESTUDIO 4

Como análisis adicional al estudio, se planteó una comparación entre un escenario nuevo (denominado 3) el cual a diferencia de los escenarios 1 y 2, este emplea tubería de PVC Orientado que permite obtener menores impactos ambientales y mayor tiempo de vida útil para la tubería. Este escenario se plantea con base en dar cobertura a las necesidades de la empresa, ya que la tubería es resistente a la fractura y menos contaminante comparada a la tubería de hierro dúctil que es el proyecto a implementar en la actualidad. Es así, que en la **Figura 27** se visualiza que el escenario 3 contribuye una carga ambiental en todo el proceso de 0.1348 mPt, seguido del escenario 1 con una contribución de 0.1415 mPt y finalmente la tubería de hierro dúctil (escenario 2) con una contribución ambiental de 0.1701

mPt. Para corroborar la comparación establecida, se presenta la caracterización por categoría de cada escenario en la **Figura 28**.



**Figura 27.** Análisis de Contribución, caso de estudio 4. **Fuente:** Método EDIP 2003



**Figura 28.** Análisis de caracterización, caso de estudio 4. **Fuente:** Método EDIP 2003

## 5. CONCLUSIONES

- ✓ La evaluación del impacto ambiental al sistema de distribución de agua potable en el municipio de El Carmen de Bolívar, mediante la metodología de análisis de ciclo de vida, permitió identificar que la etapa de tratamiento (potabilización), tiene un porcentaje de participación en la carga ambiental global poco significativo (0.0198-7%).
  
- ✓ Adicionalmente, el uso de tubería de PVC orientado, en las redes de recolección y distribución , disminuye de manera significativa los impactos ambientales potenciales debido a que este tipo de material presenta un tipo de vida de 100 años, el cual es mayor comparado con la tubería de hierro dúctil y PVC-RDE.
  
- ✓ En referencia al caso estudio 1, al analizar el sistema incluyendo la construcción de las redes de colección y distribución en PVC, usando la base de datos Industry data 2,0 y tubería de hierro dúctil de la base de datos Ecoinvent Unit Processes se encontró que el 69.4% de la carga ambiental se asociaba a la construcción de la red de distribución y captación.
  
- ✓ El caso de estudio 2, permite identificar que el subproceso de mayor porcentaje de carga ambiental para la empresa es el transporte de agua en carro tanques (90.8%), debido a las emisiones causadas al uso de combustible para su distribución.

- ✓ En el caso de estudio 3, se encontró que la mayor carga ambiental se debe al bombeo del agua cruda desde los pozos de captación hasta la planta de potabilización, esto por el alto consumo de energía eléctrica que tienen las bombas.
  
- ✓ En el caso base (escenario 2-3), se identificó la etapa del proceso que genera los IAP más elevados dentro del sistema global: redes de distribución. Esta etapa presenta un elevado porcentaje en las categorías calentamiento global y eutrofización, debido al alto consumo de energía eléctrica colombiana.

## 6. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta la evaluación de los impactos ambientales potenciales para el sistema de distribución de agua potable en el municipio de El Carmen de Bolívar a través de la empresa Acuecar S.A. se proponen algunas recomendaciones a tener en cuenta para disminuir los impactos ambientales del proceso:

- Evaluar el uso de energías alternativas renovable como la energía solar mediante el uso de paneles solares, teniendo en cuenta el alto potencial para su implementación debido a la radiación solar en la zona costera.
- Complementar el análisis para el escenario 3, incluyendo estudios de resistencias de materiales con el fin de observar si el material propuesto cumple con las especificaciones técnicas requeridas por la red con el fin de disminuir pérdidas por conexiones fraudulentas y tiempo de vida útil. También se recomienda incluir una evaluación financiera que calcule la relación costo/beneficio de la construcción del sistema de distribución y alcantarillado con PVC Orientado.
- Complementar el presente análisis de ciclo de vida (de la cuna a la puerta), luego de que en el año 2016 se construya la red de alcantarillado; llevarlo de la cuna a la tumba.
- Realizar el estudio utilizando bases de datos de los materiales e insumos colombianos, puesto que al usar bases de datos europeas y norte americanas se pueden estar aumentando o disminuyendo cargas ambientales por temas como transporte, cambio de uso de materias primas y uso de energía de diversa procedencia.

- El sistema de distribución de agua potable presenta un consumo de energía eléctrica elevado para el proceso de captación y conducción de agua cruda, por consiguiente se recomienda a Acuecar S.A. realizar un estudio de eficiencia energética de redes internas y equipos e identificar puntos críticos de máximo consumo e implementar estrategias que permitan reducir el impacto ambiental.
- Con el estudio de ACV realizado al sistema de distribución de agua potable, se evaluó que las pérdidas de agua cruda del sistema son el 26%, por lo que se recomienda a la empresa Acuecar S.A evaluar la posibilidad de adquirir tecnologías anti-conexiones ilegales.

## BIBLIOGRAFÍA

**AKHTAR Sharmin [et al.]** Life cycle sustainability assessment (LCSA) for selection of sewer pipe materials [Journal] // Clean Techn Environ Policy. - Berlín, Heidelberg : SPRINGER-VERLAG, 2014. - 17. - pp. 973-992.

**ARNOLD Karin.** Life cycle assessment of greenhouse gas mitigation of production and use of bio-methane: Sensitivity of effects from N<sub>2</sub>O emissions. [Journal] // Journal of Integrative Environmental Sciences / ed. Wuppertal Institute for Climate Environment and Energy. - Germany : [s.n.], 2010. - 1 : Vol. 7. - pp. 257-267.

**BAUMANN Henrikke and TILLMAN Anne.** The Hitch Hiker's Guide to LCA-An orientation in life cycle assessment methodology and application. [Book]. - Sweden : Studentlitteratur, Lund, 2004.

**BEAVIS P and LUNDIE S.** Integrated environmental assessment of tertiary and residuals treatment - LCA in the wastewater industry [Journal] // Water Sci. Technol. - Sydney, Australian : [s.n.], 2003. - 7 : Vol. 47. - pp. 109-116.

**BENETTO Enrico, NGUYEN Diep and LOHMANN Torben.** Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment. [Journal] // Science of the Total Environment. - Luxembourg : ELSEVIER, 2008. - 5 : Vol. 407. - pp. 1506-1516.

**BEYOND PETROLEUM (BP).** Statistical Review of World Energy [Journal] // Statical Review of World Energy. - London : BP, 2005. - SW1Y 4PD.

**BRENT Alan C.** A life cycle impact assessment procedure with resource groups as areas of protection. [Journal] // International Journal of Life Cycle Assessment. - South Africa : Ecomed Publishers, 2004. - Vol. 9. - pp. 172-179.

**BRUGGEN B van Der, VERBERK J and VERHACK J.** Comparison of pressure-driven membrane processes and traditional processes for drinking water production in Europe based on specific impact criteria [Journal] // Water SA. - Heverlee, Belgium : Water SA, July 2004. - 3 : Vol. 30. - pp. 413-420. - ISSN: 0378-4738.

**CANTER Larry W.** Manual de evaluación de impacto ambiental. Técnicas para la elaboración de estudios de impacto [Book]. - Madrid : McGraw-Hill, 1998. - p. 841. - ISSN: 84-481-1251-2.

**CHACÓN Jairo Raúl.** Historia ampliada y comentada del análisis del ciclo de vida (ACV) [Journal] // Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería.. - Colombia : [s.n.], Diciembre 2008. - 72. - pp. 37-70. - ISSN 0121-5132.

**CONESA FERNANDEZ Vicente.** Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. [Book]. - Madrid, España : Mundi Prensa, 1999.

**CONTRERAS Sanz.** Concepto de impacto ambiental y su evaluación [Book] / ed. España Instituto Tecnológico Geominero de. - Madrid : [s.n.], 1991. - p. 302.

**ESPINOZA Guillermo.** Metodologías de evaluación de impacto ambiental. Centro de Estudios para el Desarrollo [Book]. - [s.l.] : Banco Interamericano de Desarrollo, 2007. - 1 : pp. 104-118.

**FRIEDRICH E.** Environmental life cycle assessment of potable water production [Book]. - Durban, South Africa : [s.n.], 2001. - Master thesis of chemical engineering.

**GARCÍA Jessica, RODRÍGUEZ Antonio and HERRERA Israel.** Life cycle assessment to municipal wastewater treatment plant. [Journal] // Chemical Engineering Transactions. - México : [s.n.], 2011. - Vol. 24. - pp. 1345-1350.

**HERWICH Edgar, PEASE William and KOSHLAND Catherine.** Evaluating the environmental impact of products and production processes: a comparison of six methods. [Journal] // Science of the Total Environment. - California, USA : ELSEVIER, 1997. - 1 : Vol. 196. - pp. 13-29.

**HIGGINS Brendan and KENDALL Alissa.** Life cycle environmental and cost impacts of using an algal turf scrubber to treat dairy wastewater. [Journal] // Journal of Industrial Ecology. - California : [s.n.], 2012. - 3436-447 : Vol. 16.

**HUNT Robert and FRANKLIN William.** LCA-How it came about: Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA [Journal] // The International Journal of Life Cycle Assessment. - Landsberg, Germany : Ecomed, 1996. - 1 : Vol. 1. - pp. 4-7.

**INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA).** Key world energy statistics [Report] / International Energy Agency. - Paris, France. : Chirat, 2005.

**INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION.** Norma ISO: Gestion Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Marco de Referencia. [Report]. - Bogotá D.C. : ICONTEC, 2007. - (ISO:14040).

**INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION.** Norma ISO: Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso [Report]. - Bogotá D.C. : ICONTEC, 2004. - (ISO:14044).

**KIWA.** LCAqua versie 2.0 Handleiding. - July 1998.

**KURNIAWAN Jermanto and Salah KHARDI.** Comparison of methodologies estimating emissions of aircraft pollutants, environmental impact assessment

around airports [Journal] // Environmental Impact Assessment Review. - Francia : INRETS-LTE, April 2011. - 3 : Vol. 31. - pp. 240-252.

**LANDU Landu, BRENT C and ALAN.** Environmental life cycle assessment of water supply in South Africa: The Rosslyn area as a case study [Journal]. - South Africa : Water SA, 2006. - 2 : Vol. 32. - pp. 249-256.

**LASSAUX S, REMZONI S and GERMAIN A.** Life cycle assessment of the anthropic water cycle part 1 waste water treatment plants [Conference] // 9th SETAC LCA Case Studies Symposium. - Netherlands : [s.n.], 2001.

**LETCHER Trevor.** Future energy [Book]. - London : ELSEVIER, 2008. - 2.

**LUNDIE Sven [et al.]** Generation of an Industry-specific Physico-chemical allocation matrix. Application in the dairy industry and implications for systems analysis. [Journal] // The International Journal of Life Cycle Assessment. - Australia : Springer, 2005. - 2 : Vol. 12. - pp. 109-117.

**LUNDIE Sven, PETERS Gregory and BEAVIS Paul.** Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning [Journal] // Environmental Science Technology. - Sydney, Australia : [s.n.], 2004. - Vol. 38. - pp. 3465-3473.

**LUNDIN Margareta and MORRISON Gregory.** A life cycle assessment based procedure for development of environmental sustainability indicators for urban water systems [Journal] // Urban Water / ed. Water Urban. - Göteborg, Sweden : ELSEVIER, 2002. - Vol. 4. - pp. 145-152. - PII: S1462-0758 (02) 00015-8.

**MAGRINI A.** A Avaliação de impactos ambientais. [Journal]. - Brasilia : S. Margulis, 1990. - p. 238.

**MOHAMED El-Sayed [et al.]** Towards sustainability in urban water: a life cycle analysis of the urban water system of Alexandria City, Egypt. [Journal] // Journal of

Cleaner Production. - Alexandria, Egypt : ELSEVIER, 2010. - Vol. 18. - pp. 1100-1106.

**MOHAPATRA P [et al.]** Improving eco-efficiency of Amsterdam water supply: A LCA approach [Journal] // Research and technology aqua. - Indian : Journal of water Supply, Jul 2002. - 4 : Vol. 51. - pp. 217-227.

**ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD OPS.** Desigualdades en el acceso, uso y gasto con el agua potable en Colombia. [Report] / OPS. - Washington, DC : ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS), 2001.

**PÉREZ Alvaro and DUMAR kelly.** Análisis de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera y etanol. [Book]. - Bucaramanga, Colombia : [s.n.], 2011. - Tesis pregrado.

**PRE CONSULTANTS** Introduction to LCA with SimaPro 7 [Report]. - Netherlands : [s.n.], 2008. - p. 88.

**RALUY Rosa Gemma.** Evaluación ambiental de la integración de procesos de producción de agua con sistemas de producción de energía. [Book] / ed. Zaragoza Universidad de. - Zaragoza : Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Politécnico Superior., 2009. - Tesis doctoral.

**RECKMANN Karoline.** Life cycle assessment of pork especially emphasising feed and pig production [Journal] // Journal of Environmental Management. - Germany : [s.n.], 2012. - Vol. 107. - pp. 102-109.

**RENOU S [et al.]** Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA [Journal] // Cleaner Production. - Francia : ELSEVIER, 2008. - ISSUE 10 : Vol. 16. - pp. 1098-1105.

**ROY Poritosh [et al.]** A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. [Journal] // Journal of Food Engineering. - Japan : ELSEVIER, 2009. - 1 : Vol. 90. - pp. 1-10.

**SHARMIN Arktar and REZA Bahareh and HEWAGE, Kasun.** Life cycle sustainability assessment (LCSA) for selection of sewer pipe materials. [Journal] // Clean Techn Environ Policy. - Berlin : [s.n.], June 3, 2014. - Vol. 17. - pp. 973-992.

**SHIKLOMANOV Igor A.** Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World: Assessment of Water Resources and Water Availability in the World [Report] / World Meteorological Organization. - Ginebra, Suiza : UNESCO, 1997.

**SOMBEKKE H.D.M, VOORHOEVE D.K and HIEMSTRA P.** Environmental impact assessment of groundwater treatment with nanofiltration [Journal] // Desalination. - The Netherlands : Elsevier, 1997. - Issues 236 : Vol. 113. - pp. 293-296.

**TARANTINI Mario and FERRI Federica.** LCA of drinking and wastewater treatment systems of Bologna city: final results [Conference]. - Brazil : [s.n.], 2001.

**TILLMAN Anne Marie, SVINGBY Mikael and LUNDSTROM Henrik.** Life cycle assessment of municipal waste water systems [Journal] // Life Cycle Assess. - Göteborg, Sweden : [s.n.], 1998. - 3 : Vol. 3. - pp. 145-157.

**UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO).** World Water Assessment Programme, The United Nations World Water Development Report "Water for people, Water for Life" [Report] : World Water Assessment Programme,. - Paris : UNESCO PUBLISHING, BERGAHAHN BOOKS, 2003.

**VINCE Francois, AOUSTIN Emmanuelle and BREANT Philippe and MARECHAL, Francois.** LCA tool for the environmental evaluation of potable water production [Journal] // Desalination. - Switzerland : ELSEVIER, March 2008. - Vol. 220. - pp. 37-56.

**WERFF Henk van der, KANYARUSHOKI C and CORSON M.** An operational method for the evaluation of resource use and environmental impacts of dairy farms by life cycle assessment [Journal]// Journal of Environmental Management. - Francia : Elsevier, 2009. - 11 : Vol. 90.

## ANEXOS

### Anexo A. Metodologías de Análisis de Impacto Ambiental

**Lista de Chequeo, control o verificación (LCH):** son relaciones categorizadas o jerárquicas de factores ambientales a partir de las cuales se identifican los impactos producidos por un proyecto o actividad específica. Existen listas de chequeo elaboradas según el tipo de proyecto, haciendo identificación expresa de los elementos del medio que en forma particular resultan impactados por las actividades desarrolladas en el marco del mismo. Además de permitir la identificación, bien podrían así mismo incorporar escalas de valoración y ponderación de los factores, ante lo cual (MAGRINI, 1990) anota que a pesar de que constituyen una forma concisa y organizada de relacionar los impactos, no permiten la identificación de las interrelaciones entre los factores ambientales. La mayor ventaja que presentan las listas de chequeo es que ofrecen cubrimiento o identificación de casi todas las áreas de impacto; sin embargo, representan básicamente un método de identificación cualitativo, limitándose su alcance en el proceso EIA, a un análisis previo.

**Métodos matriciales (MM):** Los métodos matriciales son técnicas bidimensionales que relacionan acciones con factores ambientales; son básicamente de identificación. Los métodos matriciales, también denominados matrices interactivas causa-efecto, fueron los primeros en ser desarrollados para la EIA. La modalidad más simple de estas matrices muestra las acciones del proyecto en un eje y los factores del medio a lo largo del otro. Cuando se prevé que una actividad va a incidir en un factor ambiental, éste se señala en la celda de cruce, describiéndose en términos de su magnitud e importancia (CANTER, 1998). Uno de los métodos matriciales más conocidos es el de la Matriz de Leopold,

desarrollado en 1971 para el Servicio Geológico del Ministerio del interior de los Estados Unidos de América.

**Matriz de Leopold (ML):** Desarrollada por el Dr. Luna Leopold et al. 1991 en el Geological Survey de los Estados Unidos, especialmente para proyectos en construcción. El principio básico del método consiste, inicialmente, en señalar todas las posibles interacciones entre las acciones y los factores, para luego establecer, en una escala que varía de 1 a 10, la Magnitud e Importancia de cada impacto identificando si éste es relativamente objetivo o empírica puesto que se refiere al grado de alteración provocado por la acción sobre el factor medioambiental. Por otra parte, la puntuación de la importancia es subjetiva, ya que implica atribución de peso relativo al factor afectado en el ámbito del proyecto. El establecimiento de estos pesos constituye uno de los puntos más críticos en la Matriz de Leopold, dado que no indica claramente las bases de cálculo de las escalas de puntuación de la importancia y magnitud.

**Redes (R):** Las redes representan un avance en relación con las técnicas anteriores, ya que establecen relaciones de tipo causa-efecto, permitiendo una mejor identificación de los impactos y de sus interrelaciones. Uno de los métodos más conocidos es el de Sorensen, elaborado en 1971 para analizar diversos tipos de uso del suelo en regiones costeras. Estos diagramas son métodos que integran las causas de los impactos y sus consecuencias, mediante la identificación de las interrelaciones existentes entre las actividades o acciones causales y los factores ambientales impactados, incluyendo aquellas que representan sus efectos secundarios y terciarios (CANTER, 1998).

El método se destaca por permitir la identificación de efectos primarios, secundarios y terciarios y las relaciones causa-efecto que origina la cadena; sin

embargo, tal identificación tiene una connotación subjetiva, ya que a pesar de dejarse en manos de especialistas, ésta no tiene un procedimiento normalizado para decidir las relaciones causa-efecto o su importancia relativa. Además, las redes tienden a ser complejas y su comprensión por tanto, resulta en ocasiones difícil (CONTRERAS, 1991).

**Matriz de Batelle-Columbus (MBC):** Desarrollado en el laboratorio Barelle-Columbus, por encargo de la Oficina de Reclamaciones del Ministerio del Interior de los Estados Unidos de América para proyectos hídricos, aplicable tanto en micro como macro proyectos. El método permite la evaluación sistemática de los impactos ambientales de un proyecto mediante el empleo de indicadores homogéneos. A pesar de que este método presenta ventajas en relación con los ya descritos, dado que hace explícitas las bases de cálculo, presenta limitaciones en cuanto a la identificación de las interacciones entre impactos, pudiendo llevar a repetidos conteos y a la subestimación de los mismos.

Otro aspecto a considerar, no sólo aquí sino también en las demás técnicas que emplean escalas como unidad común de medición, es que cuando se hace uso de ellas, en realidad se comparan y se suman impactos de naturaleza distinta (CONTRERAS, 1991).

**Matriz de Conessa (MC):** Propone niveles para describir diferentes elementos ambientales (los más amplios engloban los más específicos). La escala más amplia corresponde a los sistemas y la más específica son factores ambientales. Este esquema puede variar según el enfoque que sea tomado por parte de los evaluadores (CANTER, 1998).

**Análisis de ciclo de vida (ACV):** Es una herramienta metodológica que sirve para medir las cargas ambientales de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida, desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida.

Estas cargas están relacionadas con los efectos ambientales derivados del consumo de materias primas y energía necesarias para su manufactura, las emisiones y residual generados en el proceso de producción, así como los efectos ambientales ocasionados por el fin de vida útil del producto (BAUMANN, et al., 2004).

Se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener unos resultados que muestren sus impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de los mismos.

Los elementos que se tienen en cuenta dentro del ACV, se conocen como:

- a. **Inputs/entradas:** Uso de recursos y materias primas, partes y productos, transporte, electricidad, energía, etc., que se tienen en cuenta en cada proceso/fase del sistema.
- b. **Output/salidas:** Emisiones al aire, al agua y al suelo, así como los residual y los subproductos que se tienen en cuenta en cada proceso/fase del sistema. [Banco Interamericano de Desarrollo].

En base a lo anterior, se tomó como metodología a implementar para el estudio de los IA del sistema de suministro de agua potable en el municipio de El Carmen de Bolívar, la metodología ACV, teniendo en cuenta el escenario a aplicar, datos y objetividad en la selección del método.

## Anexo B. Fases del Análisis de Ciclo de Vida

A continuación se presenta una corta descripción de cada una de las fases aplicadas a la metodología de ACV:

**Fase 1. Objetivo y Alcance de estudio:** Se inicia con la definición del tema en estudio, incluyendo una descripción de los motivos por los cuales se aplicara. Posteriormente se define la unidad funcional y la función que cumple el sistema, por su concepción, la aplicación del ACV puede resultar un proceso demasiado extenso, para ellos es preciso definir los límites del sistema bajo estudio, dentro de esta delimitación se deben identificar los procesos unitarios que participan en el ciclo de vida del sistema estudiado. Los parámetros elementales para desarrollar esta primera fase son los siguientes:

- a. **Objetivo del alcance:** Debe estar bien definido y ser claro, de aplicación coherente con la intención deseada en el estudio (GARCÍA, et al., 2011). Debido a su naturaleza, el alcance ACV debe ser ajustado durante el desarrollo de sus fases metodológicas, por tal razón es posible que estando en las fases siguientes sea necesario reajustar la fase inicial.
- b. **Objetivo del estudio:** Debe ser claro y específico para cada escenario a evaluar. Al momento de definir el objetivo, se deben tener en cuenta el propósito del estudio y las razones por las cuales se aplica y el público a quienes se presenta los resultados.

- c. **Alcance del estudio:** Es necesario considerar y describir claramente el sistema, proceso o actividad y las funciones que cumple dentro del escenario en estudio (MOHAMED, et al., 2010), para ello se define la unidad funcional del sistema y los límites del estudio. La unidad funcional proporciona una referencia de normalización matemática de los datos de entrada y salida del sistema y el límite determina que procesos unitarios integran el ACV. Para definir el sistema es preciso tener en cuenta la aplicación, la hipótesis, criterio de exclusión de flujos o datos y las limitaciones económicas.

En la definición del alcance de un ACV deben ser considerados y descritos claramente los siguientes puntos:

- i) **Función y unidad funcional:** la función o funciones del sistema describen las características de operación del mismo. La definición de una unidad funcional o característica de rendimiento es la base funcional para un ACV, ya que la unidad funcional define la escala para comparar dos o más productos incluido la mejora del producto o sistema. Todos los datos recogidos en el Análisis de Inventario (ICV Inventario de Ciclo de Vida o LCI, Life Cycle Inventory) estarán relacionados con la unidad funcional. Uno de los principales propósitos de definir una unidad funcional es proveer una referencia para la cual los datos de entrada y salida puedan ser normalizados.
- ii) **Límites del sistema:** Los límites del sistema definen los procesos y operaciones del sistema, así como las entradas y salidas que deben tomarse en cuenta en el ACV. La entrada puede ser el promedio de las entradas, así como la entrada a un solo proceso, lo mismo que para las salidas. Los procesos que estén dentro de los límites del ACV serán analizados mientras que el resto de procesos serán excluidos. Para definir

el sistema es preciso tener en cuenta la aplicación, la hipótesis, criterios de exclusión de flujos o datos y las limitaciones económicas.

**iii) Calidad de datos:** La calidad de los datos usada en el ICV se refleja en la calidad de los resultados del ACV. Cuando un ACV se realiza por primera vez, es aconsejable no despreciar ningún dato por su calidad. La calidad inicial de los datos requerida debe quedar establecida cuando se definen los siguientes parámetros:

- La antigüedad de los datos y su rango de validez temporal.
- Validez geográfica (local, regional, nacional, continental, global).
- Campo de aplicación tecnológica.

**iv) Revisión crítica del proceso:** El proceso de revisión crítica permite asegurar la calidad del ACV mediante una revisión tanto de los objetivos y alcance como de los límites del estudio. Esta revisión puede ser interna, externa o involucrar partes interesadas que fueron definidas en el objetivo y alcance del trabajo.

**Fase 2. Inventario del ciclo de vida (ICV):** El análisis de inventario (ICV) corresponde al inventario de cargas ambientales. De hecho, se trata tan solo de resolver balances de materia y energía, tras definir correctamente el sistema en estudio y presentarlo mediante un diagrama de flujo donde aparecen todas las etapas del proceso.

En ella, se realiza la recopilación de los datos y la definición de los procedimientos para el cálculo de los mismos, con ellos se cuantifican los IAP asociados a la unidad funcional. De forma práctica se define los IAP como “carga ambiental” [Chenet *al.* 2012], esta involucra emisión de gases, residuos sólidos y líquidos,

consumos de recursos naturales, ruido, radiaciones, olores etc. (HIGGINS, et al., 2012). Esta fase está compuesta por las siguientes etapas:

- a) Recopilación de datos:** El análisis de inventario incluye la recopilación y tratamiento de datos para ser usados en el cálculo del consumo de materiales y en la realización del perfil ambiental para todas las fases del ACV. Es, la mayoría de veces, la parte más intensiva del trabajo en el ACV, especialmente cuando se requieren datos de un sitio específico para todos los procesos involucrados.
- b) Ajuste de los límites del sistema:** Los límites del sistema están definidos como parte del alcance del estudio, sin embargo después de la recopilación inicial de los datos, estos pueden ser redefinidos como resultado de la exclusión de etapas de vida o subsistemas, o de la inclusión de nuevos procesos unitarios. Este análisis limita el manejo de datos y las entradas y salidas que son realmente significativas para los objetivos del estudio.
- **ACV “de la cuna a la tumba”:** incluye todas las entradas/salidas de los procesos que participan a lo largo del ciclo de vida: la extracción de materias primas, sus procesamientos, la distribución, el uso del producto y finalmente su reciclaje y/o la gestión final. El transporte, almacenaje, distribución y otras actividades intermedias entre las fases del ciclo de vida también se incluyen cuando tienen la relevancia suficiente.
  - **ACV “de la cuna a la puerta”:** El alcance del sistema se limita a las entradas/salidas desde que se obtienen las materias primas hasta que el producto se pone en el mercado.
  - **ACV “de la puerta a la puerta”:** Se limita el estudio al sistema productivo tomando en consideración las entradas/salidas del proceso, excluyendo del estudio las etapas de obtención de materias primas, transporte, uso y disposición final.

- c) Procedimiento de cálculo:** No existen procedimientos formales para llevar a cabo los cálculos en el ACV, excepto la descripción de los procedimientos de asignación.
  
- d) Validación de los datos:** la validación de los datos debe llevarse a cabo durante los procesos de recopilación para mejorar la calidad promedio de los mismos. Este proceso puede involucrar la realización de balances de masa y energía y/o realizar un análisis comparativo de factores de emisión.
  
- e) Reglas de asignación:** Cuando se lleva a cabo el ACV en sistemas complejos, puede suceder que no sea posible manejar todos los impactos y las salidas dentro de los límites del sistema. Este problema puede resolverse de dos formas: expandiendo los límites del sistema para incluir todas las entradas y salidas, o utilizando criterios de asignación para algunos de los impactos ambientales del sistema.

Debido a la naturaleza del ACV, los datos que se incluyen dentro de este, son producto de un análisis de sensibilidad que determina su importancia. Para delimitar inicialmente el sistema es necesario hacer una evaluación para conocer si los datos coinciden con los criterios en la definición del alcance del estudio.

La finalidad de esta evaluación es identificar la posibilidad de excluir etapas del ciclo de vida que carezcan de importancia (flujos de entrada o salida del sistema) o incluir etapas, procesos o flujos al sistema si el análisis de sensibilidad lo considera relevante.

**Fase 3. Análisis de impacto (AICV):** En esta fase del ACV se definen los métodos de evaluación de IAP mediante la selección de las categorías de impacto; estas pueden incidir fuertemente en los resultados del estudio. Las categorías de

impacto son de dos clases, de corte medio o final [*Udo de Haes 1999*]. Las categorías de corte medio, son las más cercanas a los IAP, estas permiten desarrollar modelos de cálculo ajustados para cada escenario, proporcionando información más detallada sobre la forma y el punto donde se causara un IAP por el desarrollo de una actividad. Las categorías de impacto de corte final, son variables que afectan directamente a la sociedad, por lo que su elección evalúa los IAP a escala global, sin embargo estas categorías de impacto no están plenamente desarrolladas ya que no existe el suficiente consenso científico (HERWICH, et al., 1997) para recomendar su aplicación.

Los resultados obtenidos en el análisis de inventario se asocian a las diferentes categorías de impacto definidas y se aplican factores de caracterización para cada componente de la categoría. Estos factores convierten el resultado del análisis del inventario a una unidad común para cada categoría de impacto, agrupando todos los resultados de esa categoría en un único valor. Los factores de caracterización pueden variar en función del método de evaluación que se utilice en esta etapa.

Esta etapa del ACV, se compone de los siguientes aspectos:

- a. Definición de las categorías:** Las categorías de impacto son seleccionadas para describir los impactos que produce el sistema. Según ISO 14044 una categoría de impacto es una clase representativa de variables medioambientales a la que pueden asignarse los resultados del inventario de Ciclo de Vida (ICV).
- b. Clasificación:** La clasificación es un paso cualitativo en un análisis científico de los procesos que tienen relevancia ambiental. La clasificación tiene que asignar el inventario de entradas y salidas a la categorías de impacto, si algunas salidas contribuyen a dos salidas de impacto diferentes, deben mencionarse dos veces. Deben definirse las categorías de impacto ambiental más relevantes que cubran en lo posible los impactos producidos

de acuerdo con los datos de inventario. Las categorías de impacto deben ser ubicadas en una escala dividiéndolas en tres grandes grupos: impactos globales, regionales y locales.

- c. Caracterización:** El objetivo de la caracterización es aplicar modelos a las categorías de impacto para obtener indicadores ambientales. Los indicadores ambientales según ISO 14044 son la representación cuantificable de una categoría de impacto.
- d. Normalización:** Engloba una serie de técnicas para evaluar la significación del perfil ambiental obtenido en la caracterización o el grado de la contribución relativa de las categorías de impacto sobre el problema ambiental global. En muchos casos se toma como referencia la media de la carga ambiental anual en un país o continente, dividido por el número de habitantes. Sin embargo la referencia puede ser elegida libremente.
- e. Ponderación:** Se evalúa cuantitativamente la importancia relativa de las distintas categorías de impacto. Si dicha valoración es cuantitativa, supone un proceso similar al de la caracterización, donde los factores de ponderación son obtenidos con criterios socioeconómicos y no científicos, donde la suma de todos ellos debe ser la unidad.

**Fase 4. Interpretación de resultados:** En esta fase se combinan los resultados del análisis de inventario con la evaluación del impacto y cada resultado obtenido de esta interpretación es transformado a una conclusión y por consiguiente a una recomendación para futuras decisiones. Esto es muy útil a la hora de identificar los procesos que aportan mayores cargas ambientales, y por último realizar mejoras al proceso que mitiguen los IA. Esta etapa ayuda a la identificación de los IA significativos y lo más importante, emite una conclusión final sobre el sistema bajo estudio (INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION., 2007).

## Anexo C. Categorías De Impacto Ambiental

Tomando en cuenta que cada uno de los métodos de análisis involucra dentro de su estructura de evaluación varias categorías de impacto, han sido seleccionadas las siguientes categorías para este ACV:

- a. **Calentamiento global (kg CO<sub>2</sub>eq):** Producido por el incremento de gases de efecto invernadero provocando el sobrecalentamiento del planeta. Los factores de caracterización de esta categoría son los potenciales de calentamiento global PCG a 100 años, obtenidos el IPC (Intergubernamental Panel on Climate Change) (GARCÍA, et al., 2011). La **Tabla 25** presenta los potenciales de calentamiento global usados, usando diferentes escalas temporales.

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
20 años	1	56	280
100 años	1	23	296
500 años	1	6.5	170

**Tabla 25.** Factor de caracterización para calentamiento global.

Fuente: García 2011

- b. **Toxicidad humana en aire y agua (m<sup>3</sup>):** Los factores de caracterización para estas categorías de impacto son, Pb para toxicidad humana aire y agua. Jolliet 1996 propuso un método semi-empirico que determinaba la respuesta general del medio y calculaba unos factores de dispersión como el radio de concentración media y la emisión (GARCÍA, et al., 2011). En la **Tabla 26**, se presentan algunos factores de esta categoría.

SUSTANCIA	SIMBOLO	TOXICIDAD HUMANA	
		AIE m <sup>3</sup>	AGUA m <sup>3</sup>
Metales pesados	As		1.5
	Cd		3.1
	Cu		0.022
	Hg	809	7.8
	Ni	0.062	3200
	Pb	1	0.86
	Zn		0.0031

**Tabla 26. Factores de caracterización toxicidad humana.**

Fuente: Jolliet 1996

- c. Reducción de la capa de Ozono (kg. eq. CFC-11):** Efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a las radiaciones UV solares de la capa de ozono atmosférica. Cuantifica las emisiones de: compuestos orgánicos halogenados. (PRE CONSULTANTS, 2008).
- d. Agotamiento de los recursos:** Disminución de los recursos para futuras generaciones (PÉREZ, et al., 2011).

CALCULO DEL IMPACTO	INDICADORES	FACTOR DE CARACTERIZACIÓN
<b>Calentamiento global</b>	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) Metano (CH <sub>4</sub> ) Clorofluorocarbonados (CFCs) Hidroclorofluorocarbonados (HCFCs) Bromuro de metilo (CH <sub>3</sub> Br)	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) equivalentes
<b>Agotamiento del ozono estratosférico</b>	Clorofluorocarbonados (CFCs) Hidroclorofluorocarbonados (HCFCs) Bromuro de metilo (CH <sub>3</sub> Br) Holanes	Triclorofluorometano equivalentes

<b>Acidificación</b>	Óxidos de azufre (SO <sub>x</sub> ) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) Ácido clorhídrico (HCl) Ácido fluorhídrico (HF) Amoniac (NH <sub>4</sub> )	Ion (H <sup>+</sup> ) equivalente
<b>Eutrofización</b>	Fosfatos (PO <sub>4</sub> ) Óxido de nitrógeno (NO) Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) Amoniac (NH <sub>4</sub> ) Nitratos	Fosfatos (PO <sub>4</sub> ) equivalentes
<b>Smog fotoquímico</b>	Hidrocarburos no metílicos	Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ) equivalentes
<b>Toxicidad terrestre</b>	Químicos tóxicos con una concentración letal reportada a roedores	Convierte los datos LC <sub>50</sub> a equivalentes
<b>Toxicidad acuática</b>	Químicos tóxicos con una concentración letal reportada a peces	Convierte los datos LC <sub>50</sub> a equivalentes
<b>Salud humana</b>	Emisiones totales al aire, agua y suelos	Convierte los datos LC <sub>50</sub> a equivalentes
<b>Agotamiento de recursos</b>	Cantidad de minerales utilizados Cantidad de combustibles fósiles utilizados	Proporción de la cantidad de recursos utilizados frente a una cantidad de recursos en reserva
<b>Uso de suelo</b>	Cantidad	Convierte la masa de los residuos sólidos en volumen usando una densidad estimada
<b>Uso del agua</b>	Agua usada o consumida	Relación de la cantidad de agua utilizada comparada con la cantidad de recursos en reserva

**Tabla 27.** Categorías de impacto más utilizadas para estudios de ACV.

**Fuente:** Dumar y Pérez, 2011

<b>CML vaselina 2001</b>	<b>EDIP 2003</b>	<b>Eco Indicador 99</b>	<b>IMPACT 2002+</b>
<b>Agotamiento recursos abióticos</b>	Calentamiento global	Cancerígenos	Cancerígenos
<b>Acidificación</b>	Disminución capa ozono	Orgánicos respirados	No cancerígenos
<b>Eutrofización</b>	Acidificación	Inorgánicos respirados	Inorgánicos respirados
<b>Calentamiento global</b>	Eutrofización	Cambio climático	Radiación ionizante
<b>Disminución capa ozono</b>	Toxicidad humana aire	Radiación	Disminución capa ozono
<b>Toxicidad humana</b>	Toxicidad humana agua	Ecotoxicidad	Orgánicos respirados
<b>Ecotoxicidad acuática</b>	Toxicidad humana suelo	ecotoxicidad	Ecotoxicidad acuática
<b>Ecotoxicidad acuática marina</b>	Ecotoxicidad acuática	Acidificación/Eutrofización	Ecotoxicidad terrestre
<b>Ecotoxicidad terrestre</b>	Ecotoxicidad terrestre	Uso de la tierra	Acidificación/nitrificación terrestre
<b>Formación fotoquímica</b>	Residuos peligrosos	Minerales	Ocupación de la tierra
<b>Radiación ionizante</b>	Residuos radiactivos	Combustibles fósiles	Acidificación acuática
<b>Uso de la tierra</b>	Recursos		Eutrofización acuática
			Calentamiento global
			Energía no renovable
			Extracción mineral

**Tabla 28.** Categorías de impacto aceptadas por ISO para cuatro métodos de evaluación de impactos de SimaPro.

**Fuente:** PréConsultants 2008b

## Anexo D. Caracterización de Aguas

Ensayo	Unidades	Método Analítico	resultado
<b>Alcalinidad total</b>	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Método HACH 8203. Volumétrico	128
<b>Cloro residual</b>	mg/L Cl <sub>2</sub>	Método HACH 8021 DPD. Espectrofotométrico	0.89
<b>Cloruros</b>	mg/L Cl <sup>-</sup>	Método HACH 8113. Espectrofotométrico	9.6
<b>Color aparente</b>	U.P.C	Método Estándar 2120 b. Comparación visual	3
<b>Conductividad</b>	μS/cm	Método HACH 8160. Electrométrico	339
<b>Dureza total</b>	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Método HACH 8203. Volumétrico	49
<b>Hierro total</b>	mg/L Fe	Método HACH 8008 Ferrover. Espectrofotométrico	0.02
<b>pH</b>	U de pH	Método HACH 8160. Electrométrico	8.69
<b>Sólidos totales</b>	mg/L	Método HACH 8160. Electrométrico	162.6
<b>Sulfatos</b>	mg/L SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Método HACH 8008. Espectrofotométrico	37
<b>turbiedad</b>	U.N.T	Método estándar 2130 B. Nefelométrico	0.56

**Tabla 29.**Caracterización de agua potable.

## Anexo E. Corrientes Generadas Para La Producción De 1 Metro De Tubería En PVC Y HD

Material / Energía	Unidad	1 metro de Tubo PVC; (400 mm diámetro); 100 años vida útil				
		Producción	Construcción	Mantenimiento	Terminación	Total
Resina PVC	kg	13.53	0.00	13.53	0.00	27.07
Carbonato Calcio	kg	0.64	0.00	0.64	0.00	1.29
Estabilizador	kg	0.44	0.00	0.44	0.00	0.87
Energía Producción	J	376666666.67	376666666.67	0.00	0.00	753333333.33
Energía Extrusión	J	236666666.67	0.00	236666666.67	0.00	473333333.33
Energía Excavación	J	0.00	56468571.43	113000000.00	0.00	169468571.43
Energía Comp	J	0.00	41333333.33	82666666.67	0.00	124000000.00
Energía Truck	J	76666666.67	3833333.33	3833333.33	7666666.67	161000000.00
Energía Reciclado	J	0.00	0.00	0.00	12733333.33	12733333.33
Energía Disposición	J	0.00	0.00	0.00	1780000.00	1780000.00

**Tabla 30.**Consumos de energía eléctrica y materias primas para tubería en PVC.

**Fuente:** Akhtar et al. 2015

Material / Energía	Unidad	1 metro de Tubo Hierro Dúctil (400 mm diámetro)				
		Producción	Construcción	Mantenimiento	Terminación	Total
Hierro Dúctil	kg	70.67	0.00	70.67	0.00	141.33
Carbono	kg	2.57	0.00	2.57	0.00	5.13
Silicona	kg	2.11	0.00	2.11	0.00	4.23
Coal	J	1676666666.67	0.00	0.00	0.00	1676666666.67
Energía Producción	J	1456666666.67	0.00	456666666.67	0.00	191333333.33
Energía Excavación	J	0.00	56333333.33	56333333.33	0.00	112666666.67
Energía Comp	J	0.00	41333333.33	41333333.33	0.00	82666666.67
Energía Truck	J	39666666.67	19833333.33	9933333.33	3966666.67	73400000.00
Energía Reciclado	J	0.00	0.00	0.00	1326666666.67	1326666666.67
Energía Disposición	J	0.00	0.00	0.00	46000000.00	46000000.00

**Tabla 31.**Consumos de energía eléctrica y materias primas para tubería en HD.

**Fuente:** Akhtar et al. 2015

Material / Energía	Unidad	1 metro de Tubo PVC Orientado (400 mm diámetro)				
		Producción	Construcción	Mantenimiento	Terminación	Total
PVC Orientado	kWh	7.50	65.60	-	2.23	75.33

**Tabla 32.**Consumos de energía eléctrica para tubería en PVC Orientado.

**Fuente:** Parrot et al. 2008

Emisiones	Unidad	1 metro de Tubo PVC Orientado (400 mm diámetro)			
		Producción	Construcción	Mantenimiento	Terminación
Calentam. Global	kg	3.33	18.63	-	1.00

**Tabla 33.** Emisiones generadas al aire para tubería en PVC Orientado.

**Fuente:** Parrot et al. 2008

Emisiones	Unidad	1 metro de Tubo PVC; (400 mm diámetro); 100 años vida útil			
		Producción	Construcción	Mantenimiento	Terminación
Calentamiento Global	kg	8.06667	1.20667	7.96667	0.32567
Emisión NOx	kg	0.05600	0.00837	0.05533	0.00226
Emisión SOx	kg	0.20267	0.03033	0.20067	0.00820

**Tabla 34.** Emisiones generadas al aire para tubería en PVC.

**Fuente:** Akhtar et al. 2015

Emisiones	Unidad	1 metro de Tubo Hierro Dúctil (400 mm diámetro)			
		Producción	Construcción	Mantenimiento	Terminación
Calentamiento Global	kg	46.66667	2.35333	2.15333	29.56667
Emisión NOx	kg	0.32267	0.01633	0.01493	0.20533
Emisión SOx	kg	1.17000	0.05900	0.05400	0.74333

**Tabla 35.** Emisiones generadas al aire para tubería en HD

**Fuente:** Akhtar et al. 2015

## Anexo F. Inventario De Ciclo De Vida

Título:	Comparando 1 p (Escenario 1) con 1 p (Escenario 2)				
Método:	EDIP 2003 V1.01 / Default				
Indicador:	Caracterización				
Omitir categorías:	Nunca				
Modo relativo:	No				
Categoría de impacto	Unidad	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2
Global warming 100a	kg CO2 eq	1,4501457	1,1283509	56,2399694	43,7600306
Ozone depletion	kg CFC11 eq	6,90E-07	4,07E-07	62,9068878	37,0931122
Ozone formation (Vegetation)	m2.ppm.h	32,966868	20,727164	61,3976391	38,6023609
Ozone formation (Human)	person.ppm.h	0,002275585	0,001435046	61,3260903	38,6739097
Acidification	m2	0,13494322	0,085352383	61,2555213	38,7444787
Terrestrial eutrophication	m2	0,38714199	0,23940947	61,7893365	38,2106635
Aquatic eutrophication EP(N)	kg N	0,001464271	0,000904895	61,8053314	38,1946686
Human toxicity air	m3	16486,964	11881,561	58,1170998	41,8829002
Human toxicity water	m3	147,54451	17,74736	89,263017	10,736983
Human toxicity soil	m3	0,41539715	0,27813511	59,8958656	40,1041344

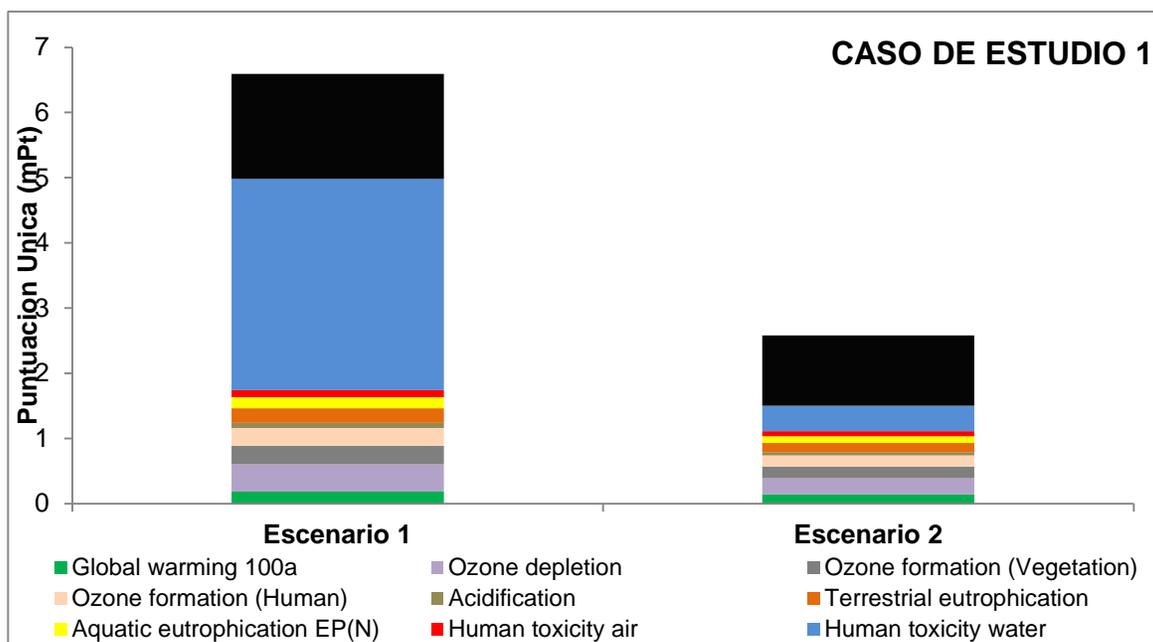
**Tabla 36.** ICV Caracterización de impactos ambientales globales caso de estudio 1.

**Fuente:** Método EDIP 2003

Título:	Comparando 1 p (Escenario 1) con 1 p (Escenario 2)				
Método:	EDIP 2003 V1.01 / Default				
Indicador:	Puntuación única				
Omitir categorías:	Nunca				
Modo relativo:	No				
Categoría de impacto	Unidad	Unidad (Pt)		Unidad (mPt)	
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2
Global warming 100a	Pt	0,0001834434	0,0001427364	0,18344343	0,14273639
Ozone depletion	Pt	0,0004221408	0,0002489158	0,42214081	0,24891577
Ozone formation (Vegetation)	Pt	0,0002824601	0,0001775903	0,28246012	0,17759034
Ozone formation (Human)	Pt	0,0002730702	0,0001722055	0,27307022	0,17220554
Acidification	Pt	0,0000798189	0,0000504859	0,07981891	0,05048594
Terrestrial eutrophication	Pt	0,0002211355	0,0001367507	0,22113551	0,13675069
Aquatic eutrophication EP(N)	Pt	0,0001707632	0,0001055289	0,17076324	0,10552885
Human toxicity air	Pt	0,0001066377	0,0000768499	0,10663768	0,07684994
Human toxicity water	Pt	0,0032415528	0,0003899095	3,2415528	0,38990951
Human toxicity soil	Pt	0,0016100793	0,0010780517	1,6100793	1,0780517

**Tabla 37.** ICV Análisis de contribución caso de estudio 1.

**Fuente:** Método EDIP 2003



**Figura 29.** Análisis de contribución caso de estudio 1.

**Fuente:** Método EDIP 2003

Título:	Comparando 1 p (Escenario 1-2) con 1 p (Escenario 2-2)				
Método:	EDIP 2003 V1.01 / Default				
Compartimento:	Todos los compartimentos				
Indicador:	Inventario				
Modo relativo:	No				
No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Escenario 1-2	Escenario 2-2
1	Calcium, in ground	Crudo	g	1,35	x
2	Chlorine	Crudo	g	1,69	25,10
3	Coal, 18 MJ per kg, in ground	Crudo	g	1,12	1,12
4	Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	Crudo	g	19,30	19,41
5	Coal, brown, 8 MJ per kg, in ground	Crudo	g	1,49	1,49
6	Energy, from hydropower	Crudo	MJ	7,30	7,35
7	Energy, kinetic (in wind), converted	Crudo	kJ	10,90	10,96
8	Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	Crudo	kJ	6,55	6,55
9	Gas, natural, 30.3 MJ per kg, in ground	Crudo	g	99,21	99,78
10	Gas, natural, 35 MJ per m3, in ground	Crudo	cu.in	431,69	431,69
11	Occupation, waterbodies, artificial	Crudo	cm2a	683,79	687,69
12	Oil, crude, 42.6 MJ per kg, in ground	Crudo	g	140,45	140,45
13	Transformation, from unknown	Crudo	mm2	446,99	449,54
14	Transformation, from water bodies, artificial	Crudo	mm2	446,99	449,54
15	Uranium, 451 GJ per kg, in ground	Crudo	µg	101,54	101,54
16	Water, well, in ground	Crudo	m3	2,48	2,48
17	Wood, unspecified, standing/kg	Crudo	mg	11,02	11,02

18	Ammonia	Aire	µg	12,58	12,58
19	Benzene	Aire	mg	16,62	16,62
20	Cadmium	Aire	µg	4,50	4,50
21	Carbondioxide	Aire	g	782,81	796,15
22	Carbondioxide, landtransformation	Aire	g	203,26	204,42
23	Carbonmonoxide	Aire	g	2,66	2,67
24	Dinitrogenmonoxide	Aire	mg	11,32	11,32
25	Heat, waste	Aire	J	446,99	449,54
26	Hydrocarbons, aromatic	Aire	mg	2,77	2,77
27	Hydrocarbons, chlorinated	Aire	ng	2,65	2,65
28	Hydrocarbons, unspecified	Aire	mg	33,14	33,33
29	Hydrogenchloride	Aire	µg	945,79	945,79
30	Hydrogenfluoride	Aire	µg	98,83	98,83
31	Lead	Aire	µg	24,74	24,74
32	Manganese	Aire	ng	378,83	378,83
33	Mercury	Aire	ng	462,59	462,59
34	Metals, unspecified	Aire	mg	1,46	1,46
35	Methane	Aire	mg	563,09	563,09
36	Methane, biogenic	Aire	g	3,33	3,34
37	Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Aire	µg	33,63	33,63
38	Nickel	Aire	µg	222,92	222,92
39	Nitrogendioxide	Aire	mg	90,21	170,02
40	Nitrogen oxides	Aire	g	9,28	9,29
41	NMVOOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Aire	g	2,89	2,89
42	PAH, polycyclicaromatichydrocarbons	Aire	µg	3,49	3,49
43	Particulates	Aire	mg	190,70	190,70
44	Particulates, SPM	Aire	mg	24,31	24,45
45	Radioactivespecies, unspecified	Aire	kBq	8,84	8,84
46	Soot	Aire	mg	169,86	170,83
47	Sulfurdioxide	Aire	mg	326,81	616,31
48	Sulfur oxides	Aire	g	1,01	1,02
49	Zinc	Aire	µg	148,18	148,18
50	Aluminum	Agua	mg	1,86	1,86
51	Ammonium, ion	Agua	mg	15,46	15,46
52	AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	Agua	µg	27,70	27,70
53	Arsenic, ion	Agua	µg	9,23	9,23
54	Barium	Agua	mg	17,78	17,78
55	BOD5, BiologicalOxygenDemand	Agua	µg	633,96	633,96
56	Cadmium, ion	Agua	µg	7,82	7,82
57	Chloride	Agua	g	3,76	3,76
58	Chromium	Agua	µg	77,83	77,83
59	COD, ChemicalOxygenDemand	Agua	mg	20,75	20,75
60	Copper, ion	Agua	µg	21,78	21,78
61	Cyanide	Agua	µg	27,83	27,83
62	DOC, DissolvedOrganicCarbon	Agua	µg	3,34	3,34
63	Hydrocarbons, aromatic	Agua	mg	6,00	6,00
64	Hydrocarbons, chlorinated	Agua	µg	6,17	6,17
65	Iron	Agua	mg	3,96	3,96
66	Kjeldahl-N	Agua	mg	2,62	2,62
67	Lead	Agua	µg	19,07	19,07
68	Mercury	Agua	ng	69,58	69,58
69	Metallicions, unspecified	Agua	mg	43,30	43,30
70	Nickel, ion	Agua	µg	28,86	28,86

71	Nitrate	Agua	mg	4,64	4,64
72	Nitrogen, total	Agua	mg	15,08	15,08
73	Oils, unspecified	Agua	mg	188,13	188,13
74	PAH, polycyclicaromatichydrocarbons	Agua	µg	92,00	92,00
75	Phenols, unspecified	Agua	µg	932,91	932,91
76	Phosphate	Agua	µg	182,97	182,97
77	Radioactivespecies, unspecified	Agua	Bq	84,53	84,53
78	Solvedsubstances, inorganic	Agua	g	2,72	2,72
79	Sulfate	Agua	mg	132,72	132,72
80	Sulfide	Agua	µg	221,63	221,63
81	Suspended substances, unspecified	Agua	mg	402,03	402,03
82	TOC, Total OrganicCarbon	Agua	mg	64,81	64,81
83	Toluene	Agua	µg	836,27	836,27
84	Water	Agua	g	114,00	195,80
85	Zinc, ion	Agua	µg	82,34	82,34
86	Calcium	Suelo	g	2,10	0,33
87	Chloride	Suelo	g	0,31	1,08
88	Iron	Suelo	mg	3,80	13,06
89	Magnesium	Suelo	g	1,01	0,16
90	Nitrite	Suelo	mg	69,61	22,85
91	Phosphate	Suelo	mg	247,50	39,15
92	Potassium	Suelo	mg	715,00	113,10
93	Sodium	Suelo	g	104,10	16,47

**Tabla 38.** Inventario global para el caso de estudio 2.

**Fuente:** Datos exportados de la herramienta informática SimaPro 7.1.

Título:	Comparando 1 p (Escenario 1-2) con 1 p (Escenario 2-2)				
Método:	EDIP 2003 V1.01 / Default				
Indicador:	Caracterización				
Omitir categorías:	Nunca				
Categoría de impacto	Unidad	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2
Global warming 100a	kg CO2 eq	1,09E+00	1,11E+00	49,6606588	50,3393412
Ozone depletion	kg CFC11 eq	4,04E-07	4,04E-07	50	50
Ozone formation (Vegetation)	m2.ppm.h	2,04E+01	2,04E+01	49,9794965	50,0205035
Ozone formation (Human)	person.ppm.h	1,41E-03	1,41E-03	49,9785542	50,0214458
Acidification	m2	8,65E-02	9,23E-02	48,3618615	51,6381385
Terrestrial eutrophication	m2	0,23578878	0,23592773	49,9852719	50,0147281
Aquatic eutrophication EP(N)	kg N	0,000900466	0,000908653	49,7737288	50,2262712
Human toxicity air	m3	9632,5188	9634,8097	49,994055	50,005945
Human toxicity water	m3	0,1063891	0,1063897	49,999859	50,000141
Human toxicity soil	m3	0,24421216	0,25336971	49,0797946	50,9202054

**Tabla 39.** ICV caracterización de impactos ambientales globales caso de estudio 2.

Título:	Comparando 1 p (Escenario 1-2) con 1 p (Escenario 2-2)				
Método:	EDIP 2003 V1.01 / Default				
Indicador:	Puntuación única				
Omitir categorías:	Nunca				
Categoría de impacto	Unidad	Unidad (Pt)		Unidad (mPt)	
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2
Global warming 100a	Pt	1,38E-04	1,40E-04	0,13829344	0,14018341
Ozone depletion	Pt	2,47E-04	2,47E-04	0,24687752	0,24687752
Ozone formation (Vegetation)	Pt	1,75E-04	1,75E-04	0,17454975	0,17469296
Ozone formation (Human)	Pt	1,69E-04	1,69E-04	0,16914906	0,16929423
Acidification	Pt	5,11E-05	5,46E-05	0,05114346	0,05460818
Terrestrial eutrophication	Pt	1,35E-04	1,35E-04	0,13468255	0,13476192
Aquatic eutrophication EP(N)	Pt	1,05E-04	1,06E-04	0,10501233	0,1059671
Human toxicity air	Pt	6,23E-05	6,23E-05	0,06230313	0,06231795
Human toxicity water	Pt	2,34E-06	2,34E-06	0,00233737	0,00233738
Human toxicity soil	Pt	0,000946566	0,000982061	0,94656632	0,98206098

**Tabla 40.** ICV Análisis de contribución caso de estudio 2.

Título:	Comparando 1 p (Escenario 1-3) con 1 p Escenario 2-3)				
Método:	EDIP 2003 V1.01 / Default				
Compartimento:	Todos los compartimentos				
Indicador:	Inventario				
Modo relativo:	No				
No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Escenario 1-3	Escenario 2-3
1	Calcium, in ground	Crudo	g	1,35E+00	x
2	Chlorine	Crudo	g	1,69E+00	2,51E+01
3	Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	Crudo	g	16,827045	16,938009
4	Energy, fromhydropower	Crudo	MJ	6,37E+00	6,41E+00
5	Energy, kinetic (in wind), converted	Crudo	kJ	9,51E+00	9,57E+00
6	Gas, natural, 30.3 MJ per kg, in ground	Crudo	g	8,65E+01	8,71E+01
7	Occupation, waterbodies, artificial	Crudo	cm2a	5,96E+02	6,00E+02
8	Transformation, fromunknown	Crudo	mm2	3,90E+02	3,92E+02
9	Transformation, from water bodies, artificial	Crudo	mm2	3,90E+02	3,92E+02
10	Water, well, in ground	Crudo	m3	2,48	2,48
11	Carbondioxide	Aire	g	2,84E+02	2,97E+02
12	Carbondioxide, landtransformation	Aire	g	1,77E+02	1,78E+02
13	Carbonmonoxide	Aire	mg	1,10E+02	1,11E+02
14	Dinitrogenmonoxide	Aire	µg	1,31E+02	1,32E+02
15	Heat, waste	Aire	J	389,77902	392,34937
16	Hydrocarbons, unspecified	Aire	mg	2,89E+01	2,91E+01
17	Methane, biogenic	Aire	g	2,90E+00	2,92E+00
18	Nitrogendioxide	Aire	mg	1,11E+02	1,90E+02
19	Nitrogen oxides	Aire	mg	8,36E+02	8,42E+02
20	Particulates, SPM	Aire	mg	2,12E+01	2,13E+01
21	Soot	Aire	mg	1,48E+02	1,49E+02
22	Sulfurdioxide	Aire	mg	400,50486	690,19613

23	Sulfur oxides	Aire	mg	2,77E+02	2,79E+02
24	Water	Agua	g	1,14E+02	1,96E+02
25	Calcium	Suelo	g	2,10E+00	3,32E-01
26	Chloride	Suelo	g	0,3135	1,07745
27	Iron	Suelo	mg	3,80E+00	1,31E+01
28	Magnesium	Suelo	g	1,01E+00	1,60E-01
29	Nitrite	Suelo	mg	6,96E+01	2,28E+01
30	Phosphate	Suelo	mg	2,48E+02	3,92E+01
31	Potassium	Suelo	mg	7,15E+02	1,13E+02
32	Sodium	Suelo	g	1,04E+02	1,65E+01

**Tabla 41.** Inventario global para el caso de estudio 3.

Título:	Comparando 1 p (Escenario 1-3) con 1 p (Escenario 2-3)				
Método:	EDIP 2003 V1.01 / Default				
Indicador:	Caracterización				
Omitir categorías:	Nunca				
Categoría de impacto	Unidad	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2
Global warming 100a	kg CO2 eq	0,52810467	5,43E-01	49,3010046	50,6989954
Ozone depletion	kg CFC11 eq	0,00E+00	0	0	0
Ozone formation (Vegetation)	m2.ppm.h	2,555106	2,5719554	49,8356817	50,1643183
Ozone formation (Human)	person.ppm.h	1,85E-04	0,000186141	49,835683	50,164317
Acidification	m2	1,52E-02	0,021092914	41,9312427	58,0687573
Terrestrial eutrophication	m2	2,12E-02	0,021380017	49,8356815	50,1643185
Aquatic eutrophication EP(N)	kg N	9,09E-05	9,91E-05	47,8427717	52,1572283
Human toxicity air	m3	8,37E+00	1,07E+01	43,9786312	56,0213688
Human toxicity water	m3	8,20E-07	1,41E-06	36,7315747	63,2684253
Human toxicity soil	m3	3,99E-03	1,31E-02	23,2687086	76,7312914

**Tabla 42.** ICV Caracterización de impactos ambientales globales caso de estudio 3.

Título:	Comparando 1 p (Escenario 1-3) con 1 p (Escenario 2-3)				
Método:	EDIP 2003 V1.01 / Default				
Indicador:	Puntuación única				
Omitir categorías:	Nunca				
Categoría de impacto	Unidad	Unidad (Pt)		Unidad (mPt)	
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2
Global warming 100a	Pt	6,68E-05	6,87E-05	0,06680524	0,06869959
Ozone depletion	Pt	0,00E+00	0,00E+00	0	0
Ozone formation (Vegetation)	Pt	2,19E-05	2,20E-05	0,02189215	0,02203651
Ozone formation (Human)	Pt	2,22E-05	2,23E-05	0,02219063	0,02233696
Acidification	Pt	9,01E-06	1,25E-05	0,00900921	0,01247646
Terrestrial eutrophication	Pt	1,21E-05	1,22E-05	0,01213226	0,01221227
Aquatic eutrophication EP(N)	Pt	1,06E-05	1,16E-05	0,01059953	0,0115554
Human toxicity air	Pt	5,42E-08	6,90E-08	5,4156E-05	6,8986E-05
Human toxicity water	Pt	1,80E-11	3,10E-11	1,8021E-08	3,104E-08
Human toxicity soil	Pt	1,54E-05	5,09E-05	0,01544873	0,050944

**Tabla 43.** ICV Análisis de contribución caso de estudio 3

Título:	Comparando 1 p (Escenario 2-3)				
Método:	EDIP 2003 V1.01 / Default				
Indicador:	Caracterización				
Omitir categorías:	Nunca				
Categoría de impacto	Unidad	Red de Distribución Agua- Tubería Fe	Pérdidas Agua tratada	Fe pipe Acuecar	PVC pipe Acuecar
Global warming 100a	kg CO <sub>2</sub> eq	82.89403919	0	14.6898495	2.41611132
Ozone depletion	kg CFC11 eq	0	0	0	0
Ozone formation (Vegetation)	m <sup>2</sup> .ppm.h	87.31869734	0	10.7059619	1.97534071
Ozone formation (Human)	person.ppm.h	87.31869792	0	10.7059614	1.97534065
Acidification	m <sup>2</sup>	29.96701214	0	62.3233044	7.70968345
Terrestrial eutrophication	m <sup>2</sup>	87.31869753	0	10.7059618	1.9753407
Aquatic eutrophication EP(N)	kg N	71.2100113	0	25.2031401	3.58684857
Human toxicity air	m <sup>3</sup>	43.27266347	0	50.3483463	6.37899024
Human toxicity water	m <sup>3</sup>	0	0	89.2893244	10.7106756
Human toxicity soil	m <sup>3</sup>	67.89590207	27.86224923	3.78751803	0.45433067

**Tabla 44.** ICV Caracterización de impactos ambientales globales escenario 2, caso de estudio 3.

Título:	Comparando 1 p (Escenario 2-3)				
Método:	EDIP 2003 V1.01 / Default				
Indicador:	Puntuación única				
Omitir categorías:	Nunca				
Categoría de impacto	Unidad	Unidad (mPt)			
		Red de Distribución Agua- Tubería Fe	Pérdidas Agua tratada	Fe pipe Acuecar	PVC pipe Acuecar
Global warming 100a	Pt	0.056947862	0	0.01009187	0.00165986
Ozone depletion	Pt	0	0	0	0
Ozone formation (Vegetation)	Pt	0.019241997	0	0.00235922	0.0004353
Ozone formation (Human)	Pt	0.019504345	0	0.00239139	0.00044123
Acidification	Pt	0.003738822	0	0.00777574	0.0009619
Terrestrial eutrophication	Pt	0.010663591	0	0.00130744	0.00024123
Aquatic eutrophication EP(N)	Pt	0.008228598	0	0.00291232	0.00041447
Human toxicity air	Pt	2.9852E-05	0	3.4733E-05	4.4006E-06
Human toxicity water	Pt	0	0	2.7716E-08	3.3246E-09
Human toxicity soil	Pt	0.034588889	0.014194145	0.00192951	0.00023145

**Tabla 45.** ICV Análisis de contribución escenario 2, caso de estudio 3.

Proceso - Categoría (GLOBAL WARNING 100a)	Unidad	Total
Total of all processes	kg CO2 eq	0,54307973
Energía Hidroeléctrica Colombiana	kg CO2 eq	0,51556052
Producción Fe	kg CO2 eq	0,022417038
Producción PVC	kg CO2 eq	0,001374391
Instalación PVC	kg CO2 eq	0,001357353
Construcción Fe	kg CO2 eq	0,001130459
Instalación Fe	kg CO2 eq	0,001034386
Construcción PVC	kg CO2 eq	0,000205591

**Tabla 46.** ICV Calentamiento global.

Proceso - Categoría (OZONE FORMATION(Vegetation))	Unidad	Total
Total of all processes	m2.ppm.h	2,57
Energía Hidroeléctrica Colombiana	m2.ppm.h	2,57

**Tabla 47.** ICV Formación de ozono por vegetación.

Proceso - Categoría (OZONE FORMATION(Human))	Unidad	Total
Total of all processes	person.ppm.h	1,63E-04
Energía Hidroeléctrica Colombiana	person.ppm.h	1,63E-04

**Tabla 48.** ICV Formación de ozono por actividades humanas.

Proceso - Categoría (Terrestrial eutrophication)	Unidad	PVCpipe Acuecar
Total of all processes	m2	0,0214
Energía Hidroeléctrica Colombiana	m2	0,0214

**Tabla 49.** ICV Eutrofización terrestre.

Proceso - Categoría (ACIDIFICATION)	Unidad	Total
Total of all processes	m2	0,021092914
Producción Fe	m2	0,011280862
Energía Hidroeléctrica Colombiana	m2	0,007238903
Producción PVC	m2	0,000693238
Instalación PVC	m2	0,00068623
Construcción Fe	m2	0,000569121
Instalación Fe	m2	0,000520825
Construcción PVC	m2	0,000103736

**Tabla 50.** ICV Acidificación.

Proceso - Categoría (Aquatic eutrophication EP(N))	Unidad	Total
Total of all processes	kg N	9,91E-05
Energía Hidroeléctrica Colombiana	kg N	8,08E-05
Producción Fe	kg N	1,49E-05
Producción PVC	kg N	9,16E-07
Instalación PVC	kg N	9,05E-07
Construcción Fe	kg N	7,53E-07
Instalación Fe	kg N	6,89E-07
Construcción PVC	kg N	1,37E-07

**Tabla 51.** ICV eutrofización acuática (N).

Proceso - Categoría (Human toxicity air)	Unidad	Total
Total of all processes	m3	10,665693
Energía Hidroeléctrica Colombiana	m3	5,2856142
Producción Fe	m3	4,3810018
Producción PVC	m3	0,2691625
Instalación PVC	m3	0,26650629
Construcción Fe	m3	0,22092231
Instalación Fe	m3	0,20220008
Construcción PVC	m3	0,04028583

**Tabla 52.** ICV Toxicidad humana en aire.

Proceso - Categoría (Human toxicity soil)	Unidad	Total
Total of all processes	m3	0,013143447
Pérdidas Agua tratada	m3	0,012585922
Producción Fe	m3	0,000453834
Producción PVC	m3	2,79E-05
Instalación PVC	m3	2,76E-05
Construcción Fe	m3	2,30E-05
Instalación Fe	m3	2,10E-05
Construcción PVC	m3	4,17E-06

**Tabla 53.** ICV Toxicidad humana en suelo.