

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL POTENCIAL DEL CICLO INTEGRAL
DEL AGUA EN EL CAMPAMENTO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.**

CIRO ALFONSO PEÑA BARAJAS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2017

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL POTENCIAL DEL CICLO INTEGRAL
DEL AGUA EN EL CAMPAMENTO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.**

CIRO ALFONSO PEÑA BARAJAS

Tesis de Maestría para optar al título de Magister en Ingeniería Ambiental

Director:

Dra. Débora Alcida Nabarlatz

Ingeniera Química, Ph.D. Ingeniería Química

Codirector:

Omar Alberto Ávila Rojas

Ingeniero Químico, M.Sc. Ingeniería Ambiental

Codirector:

Jorgelina Cecilia Pasqualino

Ingeniera Química, PhD. Ingeniería Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A Dios por darme la salud, inteligencia y sabiduría para cumplir una nueva meta en mi proyecto de vida.

A mi Padre Alfonso María quien me inculco los valores y desde el cielo continúa guiándome para lograr mis metas superando todos los obstáculos y dificultades.

A mi madre Cecilia, mujer luchadora quien me dio consejos, e inculco todos los valores y me brinda todo su apoyo y motivación para lograr todas mis metas propuestas.

A mis hermanos Doris y Leonardo quienes me brindaron todo su apoyo para hacer realidad este sueño.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos a todas las personas e instituciones que de alguna u otra forma contribuyeron para llevar a feliz término la presente Tesis de Grado.

A la empresa ISAGEN S.A.E.S.P. por el apoyo facilitándome toda la información y logística necesaria para llevar a feliz término presente proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, especialmente a los profesores de la escuela de Ingeniería Química, quienes me brindaron todos los conocimientos necesarios para lograr esta meta.

Un especial agradecimiento al Ingeniero Químico M.Sc. Omar Alberto Ávila Rojas por su incondicional apoyo, asesoría y Codirección del presente proyecto de grado, mis sinceros agradecimientos.

A las Ingenieras Débora Alcida Nabarlatz PhD y Jorgelina Cecilia Pasqualino, PhD por su apoyo en la dirección y codirección del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
2. JUSTIFICACIÓN	26
3. OBJETIVOS.....	28
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	28
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
4. MARCO DE REFERENCIA.....	29
4.1. ESTADO DEL ARTE	29
4.2. MARCO TEORICO.....	39
4.2.1. Ciclo Integral del Agua	39
4.2.1.1. Captación del agua.....	41
4.2.1.2. Potabilización	41
4.2.1.3. Distribución.....	42
4.2.1.4. Consumo	42
4.2.1.5. Recolección de agua residual	43
4.2.1.6. Depuración	43
4.2.1.7. Restitución.....	43
4.2.2. Sistema de Tratamiento de Agua Potable	44
4.2.2.1. Desarenador.....	44
4.2.2.2. Aducción/conducción.....	45

4.2.2.3. Aireación	45
4.2.2.4. Dosificación	45
4.2.2.5. Mezcla rápida y coagulación	45
4.2.2.6. Floculación	46
4.2.2.7. Decantación	46
4.2.2.8. Filtración.....	46
4.2.2.9. Desinfección.....	47
4.2.3. Sistema de Tratamiento de Agua Residual	47
4.2.4. Estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	49
4.2.4.1. Métodos de Cálculo.....	51
4.2.4.2. Categorías de Impacto	52
5. DESARROLLO METODOLOGICO	54
5.1 CONSECUCIÓN DE INFORMACIÓN	54
5.2. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE PROCESOS	55
5.2.1. Captación	57
5.2.2. Tratamiento de agua de pozo.....	57
5.2.3. Sistema de Tratamiento de agua potable.....	57
5.2.4. Distribución.....	59
5.2.5. Consumo	59
5.2.6. Red de saneamiento	60
5.2.7. Sistema de Tratamiento de agua residual	60
5.3. ANÁLISIS DE PROCESO	63
5.4. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS A EVALUAR	67
5.5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACV AL CICLO INTEGRAL DEL AGUA	68

5.5.1. Definición del objetivo y alcance	69
5.5.1.1. Definición del Objetivo.....	69
5.5.1.2. Definición del Alcance de estudio.....	69
5.5.1.3. Unidad Funcional.....	69
5.5.1.4. Límites Geográficos.....	70
5.5.1.5. Límites Temporales	71
5.5.1.6. Reglas de Exclusión	71
5.5.2. Análisis del Inventario de Ciclo de vida – ICV	71
5.5.2.1. Balances de masa y energía	72
5.5.2.2. Flujos ambientales asociados al Ciclo Integral del Agua.....	75
5.5.2.3. Fuentes de Datos	76
5.5.2.4. Calidad y Revisión de Información	76
5.5.3. Métodos de Evaluación del Inventario de Ciclo de vida	77
5.5.3.1. Método de selección para la EICV	77
5.5.3.2. Selección de software y método de evaluación.....	77
5.5.3.3. Selección de categorías de evaluación de impactos	77
6. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	80
6.1. Análisis de Impacto Ambiental potencial para la Planta de Potabilización usando Permanganato de Potasio.....	80
6.1.1. Análisis de Contribución Ambiental PTAP-KMnO ₄	80
6.1.2. Análisis de Caracterización PTAP-KMnO ₄	83
6.1.3. Análisis por Atributos PTAP-KMnO ₄	84
6.2. Análisis de Impacto Ambiental potencial para la Planta de Potabilización usando Ozono.....	89

6.2.1. Análisis de Contribución Ambiental PTAP-KMnO ₄	89
6.2.2. Análisis de Caracterización PTAP-Ozono.	91
6.2.3. Análisis por Atributos PTAP-Ozono.....	93
6.3. Análisis Comparativo para la Planta de Potabilización usando Permanganato de Potasio vs Ozono.	96
6.4. Análisis de Impacto Ambiental potencial para la etapa de Distribución y consumo del Campamento El Cedral.	98
6.4.1. Análisis de Contribución Ambiental para la etapa de Distribución y consumo.	98
6.4.2. Análisis de Caracterización para la etapa de Distribución y consumo.	99
6.4.3. Análisis por Atributos para la etapa de Distribución y consumo.	100
6.5. Análisis de Impacto Ambiental potencial para la planta PTARd.	102
6.5.1. Análisis de Contribución Ambiental para la planta PTARd.....	103
6.5.2. Análisis de Caracterización para la planta PTARd.	104
6.5.3. Análisis por Atributos para la planta PTARd.....	105
6.6. Análisis de Impacto Ambiental potencial para el Ciclo Integral del Agua del Campamento El Cedral.	108
6.6.1. Análisis de Contribución Ambiental para el Ciclo Integral del Agua.	108
6.6.2. Análisis de Caracterización para el Ciclo Integral del Agua.	110
6.6.3. Análisis por Atributos del Ciclo Integral del Agua	111
6.7. Análisis Adicional del Poder de Calentamiento Global.....	114
6.8. Tecnología de tratamiento para el reúso del agua.	115
7. CONCLUSIONES	123
8. RECOMENDACIONES	126
BIBLIOGRAFÍA	127
ANEXOS	133

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ciclo del Agua auto-sostenible.....	31
Figura 2. Condiciones de Frontera	33
Figura 3. Ciclo Integral del Agua con agua regenerada y de ósmosis inversa de agua de mar.....	34
Figura 4. Ciclo Integral del Agua en Cataluña.....	36
Figura 5. Ciclo Integral del Agua en Córdoba.....	38
Figura 6. Fases del Ciclo Integral del Agua.....	40
Figura 7. Fases del Análisis de Ciclo de Vida.	50
Figura 8. Metodología a implementar.....	54
Figura 9. Ubicación Geográfica del Proyecto.	56
Figura 10. Diagrama del Ciclo Integral del Agua del Campamento el Cedral.	56
Figura 11. Diagrama de Proceso del Ciclo Integral del Agua.....	63
Figura 12. Límites y Procesos Unitarios del Ciclo Integral del Agua.	70
Figura 13. Árbol de proceso de la Planta de Tratamiento de Agua Potable con permanganato de potasio (corte de visualización del 0.0005%).	82
Figura 14. Caracterización global del Impacto Ambiental Potencial - Planta PTAP consumo KMnO4.....	84
Figura 15. Perfil medioambiental para la categoría Acidificación - Planta PTAP consumo KMnO4.	86
Figura 16. Perfil medioambiental para la categoría Calentamiento global- Planta PTAP consumo KMnO4.....	87
Figura 17. Perfil medioambiental para la categoría Eutrofización- Planta PTAP consumo KMnO4.	88
Figura 18. Perfil medioambiental para la categoría Toxicidad Humana- Planta PTAP consumo KMnO4.....	89

Figura 19. Árbol de proceso de la Planta de Tratamiento de Agua Potable con ozono (corte de visualización del 0.0005%).....	90
Figura 20. Caracterización global del Impacto Ambiental Potencial - Planta PTAP consumo Ozono.	92
Figura 21. Perfil medioambiental para la categoría Acidificación - Planta PTAP consumo ozono.	94
Figura 22. Perfil medioambiental para la categoría Calentamiento global- Planta PTAP consumo Ozono.	95
Figura 23. Perfil medioambiental para la categoría Eutrofización- Planta PTAP consumo Ozono.....	96
Figura 24. Caracterización global del Impacto Ambiental Potencial comparativo de la Planta PTAP usando KMnO4 versus Ozono.....	97
Figura 25. Árbol de proceso de la etapa de Distribución y Consumo de Agua (corte de visualización del 0.01%).....	98
Figura 26. Caracterización global del Impacto Ambiental Potencial - Etapa de Distribución y Consumo de Agua	99
Figura 27. Perfil medioambiental para la categoría Calentamiento global- Etapa de Distribución y Consumo de Agua.	101
Figura 28. Perfil medioambiental para la categoría Eutrofización- Etapa de Distribución y Consumo de Agua.....	101
Figura 29. Perfil medioambiental para la categoría Ecotoxicidad Acuática- Etapa de Distribución y Consumo de Agua.	102
Figura 30. Árbol de proceso de la Planta PTARd (corte de visualización del 0.005%).	103
Figura 31. Caracterización global del Impacto Ambiental Potencial – Planta PTARd. .	105
Figura 32. Perfil medioambiental para la categoría Calentamiento global- Planta PTARd.	107
Figura 33. Perfil medioambiental para la categoría Eutrofización- Etapa de Distribución y Consumo de Agua.....	107
Figura 34. Árbol de proceso del Ciclo Integral del Agua – Campamento El Cedral (corte de visualización del 0.0005%).....	109

Figura 35. Caracterización global del Impacto Ambiental Potencial del Ciclo Integral del Agua del Campamento el Cedral.	111
Figura 36. Perfil medioambiental para la categoría Calentamiento global- Ciclo Integral del Agua.	112
Figura 37. Perfil medioambiental para la categoría Eutrofización- Ciclo Integral del Agua.	113
Figura 38. Perfil medioambiental para la categoría Ecotoxicidad- Ciclo Integral del Agua.	113
Figura 39. Perfil medioambiental del Poder de calentamiento global- Ciclo Integral del Agua.	114
Figura 40. Esquema propuesta tecnología reúso del agua	122

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de las categorías de impacto según la metodología CML.	52
Tabla 2. Caracterización del agua antes y después de la PTAP (KMnO ₄)	64
Tabla 3. Parámetros adicionales del agua antes y después de la PTAP (KMnO ₄).	65
Tabla 4. Caracterización del agua antes y después de la PTAR.....	65
Tabla 5. Caracterización Río Sogamoso (antes de captación y después vertimiento)...	66
Tabla 6. Caracterización del agua antes y después de la PTAR.....	67
Tabla 7. Balance Másico - escenario con Permanganato de Potasio en la PTAP.	72
Tabla 8. Balance Másico para el escenario con Ozono en la PTAP.	72
Tabla 9. Balance Másico en el Campamento el Cedral.....	73
Tabla 10. Balance Másico en la PTARd.....	73
Tabla 11. Flujos Energéticos en la Planta de Potabilización.	74
Tabla 12. Flujos Energéticos en el Campamento El Cedral.	74
Tabla 13. Flujos Energéticos en la Planta de Depuración.....	74
Tabla 14. Flujos Energéticos Semestral del CIA	75
Tabla 15. Flujos Ambientales (Cargas ambientales)	75
Tabla 16. Comparación de Métodos de EICV según el Estado del Arte.	78
Tabla 17. Resultados de caracterización global de la planta PTAP-KMnO ₄	83
Tabla 18. Resultados de Análisis por Atributos para la planta PTAP-KMnO ₄	85
Tabla 19. Resultados de caracterización global de la planta PTAP-Ozono.	91
Tabla 20. Resultados de Análisis por Atributos para la planta PTAP-Ozono.	93
Tabla 21. Resultados de caracterización global para la comparación de la planta PTAP usando permanganato de potasio vs Ozono.	97
Tabla 22. Resultados de caracterización global - Distribución y Consumo de Agua.....	99
Tabla 23. Resultados de Análisis por Atributos - Distribución y Consumo de Agua.....	100
Tabla 24. Resultados de caracterización global de la Planta PTARd.....	104
Tabla 25. Resultados de Análisis por Atributos de la Planta PTARd.....	105

Tabla 26. Resultados de caracterización global del Ciclo Integral del Agua del Campamento el Cedral.	110
Tabla 27. Resultados de Análisis por Atributos del Ciclo Integral del Agua del Campamento el Cedral.	111
Tabla 28. Tecnología para el tratamiento de aguas residuales.	116
Tabla 29. Tecnología para el tratamiento de aguas residuales.	117
Tabla 30. Técnicas de Tratamiento según la tecnología de ozonización.	118
Tabla 31. Técnicas de Tratamiento según la tecnología de Membranas.	119
Tabla 32. Métodos de Evaluación de Impactos en la metodología ACV.	136
Tabla 33. Factores de caracterización del Agotamiento de recursos Abiótico.	138
Tabla 34. Factores de caracterización, categoría Acidificación.	139
Tabla 35. Factores de caracterización, GWPP en kgCO ₂ kg ⁻¹ . Fuente: IPCC 2007. ...	140
Tabla 36. Factores de caracterización, Categoría Eutrofización.	141
Tabla 37. Factores de equivalencia HTP, ATP, TTP, Categoría Toxicidad.	142
Tabla 38. Categorías de Impacto según el Método CML 2001.	144
Tabla 39. Caracterización de Agua de Pozo	145
Tabla 40. Caracterización de Agua Superficial (Río Sogamoso).....	146
Tabla 41. Caracterización de Agua a la Entrada de la de Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP).	147
Tabla 42. Caracterización de Agua a la Salida de la de Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP).	148
Tabla 43. Caracterización de Agua a la Entrada de la de Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (PTARD).	149
Tabla 44. Caracterización de Agua a la Salida de la de Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (PTARD).	149
Tabla 45. Equipos utilizados en la Plana de Tratamiento de Agua Potable.	150
Tabla 46. Equipos utilizados en la Plana de Tratamiento de Agua Residual.	150
Tabla 47. Caracterización de Agua de Pozo	151
Tabla 48. Relación de Tecnologías para el Re-uso de agua residual.	153

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Términos y Definiciones.....	133
Anexo B. Descripción de Métodos de Evaluación de ACV.....	136
Anexo C. Descripción de Categorías de Impacto, Método CML.	138
Anexo D. Categorías de Impacto, Método CML 2001. Versión 2.04. SimaPro.	144
Anexo E. Caracterización Trimestral de Agua antes y después de los puntos de estudio.	145
Anexo F. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida.....	151
Anexo G. Tecnologías para la Reutilización de agua residual.	153

ABREVIATURAS

ACP: Acidificación Potencial

ACS: Agua caliente sanitaria

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

CIA: Ciclo integral del agua

CFC: clorofluorocarburos

COV: Compuestos Orgánicos Volátiles

EACV: Evaluación del Análisis de Ciclo de Vida

EIA: Estudio de Impacto Ambiental

EIAP: Evaluación de Impacto Ambiental Potencial

EICV: Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida

EP: Eutrofización Potencial

GEI: Gas de Efecto de Invernadero

GWh: Gigawatt hora

GWP: Calentamiento global

IAP: Impacto Ambiental Potencial

ICV: Inventario de Ciclo de Vida

kWh: Kilowatt hora

PTAP: Planta de Tratamiento de agua Potable

PTAR: Planta de Tratamiento de agua Residual

PTARd: Planta de Tratamiento de agua Residual doméstica.

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL POTENCIAL DEL CICLO INTEGRAL DEL AGUA EN EL CAMPAMENTO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.*

AUTOR: Ciro Alfonso Peña Barajas**

PALABRAS CLAVES: Análisis Ciclo Vida, Potabilización, Agua residual, Ciclo del agua.

DESCRIPCIÓN:

El proyecto se desarrolló en el campamento El Cedral de la Central Hidroeléctrica Sogamoso de la vereda La Putana del municipio de Betulia, Santander. Según el enfoque prospectivo sobre el ciclo integral del agua, fue seleccionada la metodología de ACV comparativa y por atributos, bajo la tipología comparativa “cuna a la tumba”; con el fin de establecer una aproximación ambiental desde el punto de vista del consumo eléctrico y consumo de insumos químicos, que permitieron evaluar los impactos ambientales potenciales generados en las diferentes etapas de captación de agua, de tratamiento del agua potable, distribución y uso del agua en campamento y el tratamiento de agua residual de uso doméstico. La unidad funcional fue 1 m³ de agua potable y al tratamiento de 1 m³ de agua residual doméstica. El método de evaluación usado fue Método CML 2001 v2.O4, adscrito al software Simapro 7.1®.

El estudio estableció tres escenarios; la caracterización ambiental del primer escenario, determinó mayor impacto ambiental por el Ozono (diferencia del 15% aproximadamente) comparado entre los dos escenarios, para todas las categorías de estudio (debido al consumo de energía para el suministro de O₃). El análisis de contribución ambiental del tercer escenario, estableció que el mayor impacto obedece al proceso de distribución y consumo de agua potable en un 72.2%, seguido de la potabilización con O₃ (25%) y del proceso de depuración de agua residual doméstica (3%). Estos impactos están directamente relacionados al consumo de energía eléctrica en las actividades de oficina, captación y bombeo, succión entre las más importantes. Finalmente, el análisis del poder de calentamiento global se vió afectada directamente por el consumo de energía eléctrica procedente de recursos no renovables, pues estos emiten contaminantes como: NO_x, compuestos orgánicos (volátiles, semivolátiles y condensables) y gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O).

*Trabajo de Aplicación.

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Ambiental. Directora: Dra. Débora Álcida Nabarlatz; Codirectores: M.Sc. Omar Alberto Ávila Rojas y Dra. Jorgelina Cecilia Pasqualino.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE POTENTIAL ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE WATER INTEGRAL CYCLE IN THE CAMP OF A HYDROELECTRIC POWER PLANT. *

AUTHOR: Ciro Alfonso Peña Barajas**

KEYWORDS: Life Cycle Analysis, Potabilization System, Wastewater Treatment, Water Cycle.

DESCRIPTION:

The project was developed in the El Cedral camp of the Sogamoso Hydroelectric Power Plant in the village of La Putana in the municipality of Betulia, Santander. According to the prospective approach on the integral water cycle, the methodology of comparative LCA and attributes was selected, under the comparative typology "cradle to grave"; in order to establish an environmental approach from the point of view of electricity consumption and consumption of chemical inputs, which allowed to evaluate the potential environmental impacts generated in the different stages of water collection, drinking water treatment, distribution and use of water in camp and the treatment of residual water for domestic use. The functional unit was 1 m³ of drinking water and the treatment of 1 m³ of domestic wastewater. The evaluation method used was Method CML 2001 v2.O4, assigned to Simapro 7.1® software.

The study established three scenarios; the environmental characterization of the first scenario, determined a greater environmental impact by Ozone (difference of approximately 15%) compared between the two scenarios, for all study categories (due to energy consumption for the supply of O₃). The analysis of environmental contribution of the third scenario, established that the greatest impact is due to the process of distribution and consumption of drinking water in 72.2%, followed by the purification with O₃ (25%) and the process of purification of domestic wastewater (3 %). These impacts are directly related to the consumption of electrical energy in office activities, catchment and pumping, suction among the most important. Finally, the analysis of the power of global warming was directly affected by the consumption of electricity from non-renewable resources, as they emit pollutants such as: NO_x, organic compounds (volatile, semi-volatile and condensable) and greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O).

* Application Work

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Ambiental. Directora: Dra. Débora Álcida Nabarlatz; Codirectores: M.Sc. Omar Alberto Ávila Rojas y Dra. Jorgelina Cecilia Pasqualino.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural renovable que ha sido utilizado desde la antigüedad para generar energía, sin embargo, debido a la intervención del hombre en el ciclo hidrológico se ha presentado un desequilibrio, que aunado al cambio climático ocasionado por la contaminación ambiental, hacen que el agua se constituya en un recurso consumidor de energía. El crecimiento de la población mundial demanda de un mayor consumo de este recurso, haciéndolo cada vez más escaso y con menor disponibilidad, pues según las cifras, un 3% del agua del planeta es agua dulce y sólo el 0,003% del recurso agua está disponible para el consumo humano BENITO DÍAZ (2011); lo anteriormente expuesto indica que es necesario hacer un uso mas eficiente del recurso e implementar tecnologías de tratamiento que permitan el suministro del agua potable a la población humana, esto requiere de un mayor consumo de energía e insumos químicos.

La alteración del clima debido a la contaminación ambiental, ha modificado el régimen de lluvias haciendo que estas sean más escasas, por tanto, el suministro de agua potable requiere de mayor consumo de energía, puesto que algunos municipios carecen de este recurso debido al no tener fuentes hídricas para abastecer sus acueductos o éstas se encuentran a niveles inferiores de los sitios de consumo o se requiere extraer de pozos subterráneos. Lo anteriormente descrito, implica un alto consumo de energía, ya que se debe hacer a través del sistema de bombeo (RYGAARD, et al., 2010). Por otra parte, muchas fuentes hídricas están contaminadas, lo que requiere de tratamientos de potabilización, que dependiendo del grado de contaminación, requieren menor o mayor consumo de energía y químicos (PENAGOS, 2007).

En Colombia el consumo básico de agua según la resolución Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico CRA 271 de 2003 debería ser de 20 m³/suscriptor/mes. Datos reportados por AGUILERA. (2016), entre el 2005 y 2015 en clima cálido se pasó de consumir 19 m³/suscriptor/mes a 15 m³/suscriptor/mes., en el clima templado se pasó de 16 m³/suscriptor/mes a 13 m³/suscriptor/mes y en clima frio el consumo descendió de 12

m³/suscriptor/mes a 10 m³/suscriptor/mes. La disminución del consumo de agua en Colombia para las fechas reportadas, se debió a la implementación de campañas de sensibilización y ahorro eficiente del recurso hídrico. Por otra parte, con el fin de tener sostenibilidad del recurso hídrico, se requiere que una vez se haga uso de las aguas servidas, estas deben ser tratadas para luego verterlas bajo unas características óptimas (95% de remoción de contaminantes) al efluente. Es de resaltar que todos los tratamientos del agua requieren del consumo de energía e insumos, los cuales generan gases efecto invernadero “GEI”, ocasionando impactos ambientales potenciales, que deben ser cuantificados y valorados.

Según Environmental Protection Agency (EPA, (2010)) “se consumen aproximadamente 56.000 millones de kilovatios por hora (kWh) en servicios de agua potable y aguas residuales. Suponiendo el uso medio de las fuentes de energía de U.S.A., esto equivaldría a una emisión de 45 millones de toneladas de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Adicionalmente, según ATLAS COPCO (2010) una planta típica de tratamiento biológico de aguas residuales con sistema de soplante de aireación representa el 70% del consumo energético, considerando que una reducción del 10% del consumo energético total del sistema de tratamiento de aguas residuales podría representar un ahorro de unos 400 millones de dólares anuales.

La Central Hidroeléctrica Sogamoso cuenta con el campamento El Cedral, de capacidad máxima de 300 personas, donde actualmente se alojan en promedio 100 personas. El campamento se abastece de agua procedente del río Sogamoso y de un pozo subterráneo los cuales presentan características deficientes de potabilidad, es decir que se trata de agua no potable. Una vez es captada el agua, esta es conducida por medio de una tubería hasta la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), para purificarla y luego ser distribuida a las diferentes áreas (oficinas, viviendas, casino, piscina, etc.) del campamento, para su respectivo uso y consumo (aseo personal, alimentación, lavandería, aseo del campamento, entre otros). El agua tratada presenta buenas características de potabilidad para el consumo humano, como lo establece la Organización Mundial de la Salud (OMS). Posteriormente, el agua utilizada (servida) es transportada a través de redes de alcantarillado hacia la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), en donde se realiza el tratamiento respectivo. Este tratamiento consta de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como función reducir la carga

contaminante alcanzando una remoción de la DBO₅, DQO y SST en un 95%, dando cumplimiento a la normatividad ambiental, mediante la combinación de dos tecnologías como son: los sistemas aerobios de lodos activados y los sistemas de lecho fijo, para luego ser vertida al río Sogamoso, como etapa final del ciclo integral del agua.

Para evaluar los impactos ambientales potenciales asociados al consumo de agua en el campamento El Cedral, se llevará acabo este trabajo bajo la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que permite identificar, cuantificar y evaluar los impactos ambientales potenciales asociados al ciclo integral del agua por m³ desde el sistema de captación, conducción, tratamiento (Planta de potabilización), distribución y consumo del campamento El Cedral adscrito a la central hidroeléctrica (Sogamoso), para que finalmente el agua usada sea depurada y vertida en la fuente hídrica Sogamoso del departamento de Santander.

Este proyecto consta los siguientes capítulos: En el primero se define el estado del arte y marco teórico, enfocado al ciclo integral del agua, los sistemas de tratamiento de agua potable y agua residual, y la metodología de ACV. El segundo capítulo describe la metodología aplicada para el desarrollo del estudio, con base en la aplicación de las normas ISO 14040 e ISO 14044 (Gestión Ambiental, ACV; principios y marco de referencia, requisitos y directrices) dividida en cuatro fases: Objetivos y alcance de estudio, inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, análisis y evaluación de potenciales impactos ambientales, y la interpretación de los resultados.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los aportes realizados por RYGAARD et al., (2010), VINCE, et al., (2008), PENAGOS, (2007) y LUNDIE et al., (2004) en sus estudios de evaluación ambiental del ciclo integral del agua urbana, demostraron mediante su análisis e interpretación, que los impactos ambientales potenciales asociados a cada etapa del proceso, se deben principalmente a las emisiones (CO₂, CH₄, NO_x, etc.) asociadas al consumo de energía eléctrica, consumo de químicos y transporte de materiales específicamente en la extracción y distribución del agua, como en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

Por lo anterior y con base en los diferentes consumos energéticos (energía eléctrica), máxicos (químicos, insumos) y volumétricos (agua) requeridos en las distintas etapas (captación, conducción, potabilización, distribución, consumo, red de alcantarillado, depuración y vertimiento) que conforman el ciclo integral del agua en el campamento el Cedral de la Central Hidroeléctrica Sogamoso; surge la necesidad de realizar una valoración de los impactos ambientales potenciales asociados a cada una de las etapas enunciadas, debido a que en la actualidad no se cuenta con estudio alguno que le permita a la empresa tomar decisiones en cuanto a las modificaciones que se pueden realizar en cada una de la etapas del ciclo integral del agua y que favorezcan el ahorro de energía e insumos químicos; para tal fin la empresa suministrará la información necesaria para la consolidación del estudio. Adicionalmente, la Hidroeléctrica requiere valorar los impactos ambientales que se generan al utilizar la energía eléctrica proveniente de la empresa EPM y no de la que se genera internamente; así, como de los impactos asociados por otros factores en los diferentes procesos. El estudio considera que el campamento consume en promedio 61.5 m³ de agua diaria, es decir, un consumo per cápita de 395 litros por día, lo que implica altos consumos de energía e insumos químicos, para la evaluación respectiva.

La hidroeléctrica solo realiza actividades de monitoreo y caracterización de aguas, con el fin de verificar el cumplimiento de los parámetros indicados en la normatividad ambiental; sin

embargo, los tratamientos implementados requieren del consumo de energía e insumos químicos, que conllevan a la generación de emisiones (agua, aire, suelo) que en el momento no se han valorado. A su vez, la empresa actualmente no ha determinado el porcentaje de energía utilizada en la operación de cada una de las plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales domésticas, así como la cuantificación del inventario de dichas emisiones, razones principales para dar inicio y puesta en marcha del proyecto en mención.

Otra consideración del estudio, es la utilización del químico Permanganato de Potasio en el proceso de floculación del agua en la PTAP, el cual debe ser reemplazado del proceso, por su poca demanda, alto costo, y porque es un químico controlado por la unidad de estupefacientes.

No obstante, la empresa proveedora de la PTAP implementará un sistema de purificación a través de un Equipo de Oxidación de gran eficiencia llamado Súper O₂, que permite desestabilizar la materia orgánica y los metales disueltos mediante el proceso de oxidación, para la obtención de agua, gas carbónico y/o partículas sólidas, que luego serán retiradas mediante floculación, flotación y/o sedimentación. Este sistema purifica el agua de manera más efectiva, aprovechando el oxígeno con mejores resultados comparado al uso del permanganato de potasio. Sin embargo, es una tecnología reciente que requiere ser evaluada, con el fin de valorar sus impactos potenciales con respecto a los impactos generados por el uso del Permanganato de Potasio.

Adicionalmente, la Central Hidroeléctrica adelanta una campaña acerca del uso y ahorro eficiente de agua y energía, que implica la sensibilización a los trabajadores, la implementación de dispositivos ahorradores y el mantenimiento de equipos, lo cual permitirá comparar los ahorros actuales con los datos históricos de la empresa. Por ende, es importante realizar un estudio que permita analizar los impactos asociados a la gestión del ciclo integral del agua en el Campamento El Cedral; estos resultados serán un buen aporte a la campaña, ya que permitirían a la empresa tomar las decisiones respecto a las posibles modificaciones a implementar en las etapas del Ciclo integral del agua, con el fin de disminuir los consumos

energéticos y de insumos químicos, y por consiguiente mitigar impactos ambientales asociados a dichos consumos. De igual forma, el estudio ofrecerá alternativas de re-uso de agua que ayudarán a disminuir dichos impactos. La metodología propuesta para resolver la problemática planteada, es ACV por atributos y comparativa, que según la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) es definida como un proceso objetivo que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto y facilita poner en práctica la mejor estrategia medioambiental planteada, que ayuda a mitigar los impactos evaluados (BENITO DÍAZ, 2011).

2. JUSTIFICACIÓN

Frente a la escasez, sobreexplotación y contaminación del agua a nivel mundial, la única forma de abordar la situación es remitirnos al ciclo hidrológico ó ciclo del agua para, entendiendo su funcionamiento, tratar de evitar que la intervención del hombre en el mismo, desde que desvía el agua de este ciclo natural hasta que la devuelve, no lo desestabilice acabando con todos los ecosistemas que de él dependen (LÓPEZ DE ASIAIN, et al., 2007). Por otro lado, el suministro de agua potable para consumo humano requiere cumplir con los Índices de calidad establecidos por la Organización Mundial de la Salud OMS, lo que implica realizar procesos de tratamiento que permitan garantizar el cumplimiento de los parámetros establecidos; así mismo, se debe hacer un uso sostenible del recurso hídrico mediante la ejecución de prácticas que permitan mitigar la contaminación de los efluentes, como lo es, el tratamiento a las aguas servidas que minimizan el vertimiento de sustancias contaminantes que puedan afectar al ecosistema acuático y el suministro del recurso a poblaciones asentadas aguas abajo.

El campamento El Cedral ubicado en la Central Hidroeléctrica Sogamoso dando cumplimiento a lo anteriormente descrito, realiza los respectivos tratamientos de potabilización del agua, así como la depuración de la misma, garantizando una remoción aproximada del 95% de sustancias contaminantes, esto requiere de un consumo de energía y compuestos químicos, de los cuales no se ha realizado una valoración a los impactos ambientales potenciales que puedan afectar los recursos naturales.

Mediante la aplicación de la metodología de ACV en cada una de las etapas del ciclo integral del agua para uso doméstico del campamento el Cedral, está permitirá tomar decisiones frente a la implementación de las prácticas encaminadas al uso sostenible del recurso hídrico, de tal manera que se garantice el suministro de agua de buena calidad, haciendo uso eficiente de energía eléctrica y los insumos químicos que permitan disminuir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), generadas dentro de la central hidroeléctrica.

Es así, como este proyecto evalúa los impactos ambientales potenciales asociados a la gestión del ciclo integral del agua del campamento el Cedral de la Central Hidroeléctrica Sogamoso; analizando cada una de sus etapas desde la captación, conducción, potabilización, distribución, depuración y vertimiento al efluente. Los impactos ambientales a estudiar son los originados por el consumo de energía eléctrica, combustible e insumos químicos, requeridos para el funcionamiento de los equipos de todo el proceso.

Otro aspecto relevante que cabe enunciar, es que en los últimos años el aumento en la producción de aguas residuales, es continuo; generando el vertimiento parcial o sin tratamiento a los cuerpos hídricos de materiales contaminantes, al igual que la problemática asociada a la disposición final inadecuada de subproductos y residuos generados (gases, sólidos, lodos, etc.) ODUM, et al., (2003), en tal sentido es necesario analizar y proponer una tecnología que permita realizar el reúso del agua en el Campamento el Cedral.

Por lo tanto, el presente proyecto plantea una tecnología de tratamiento para el reúso de las aguas servidas con el fin de disminuir la carga contaminante al efluente, que conlleva a una reducción en el pago de la tasa retributiva, como lo establece la resolución 1207 del 25 de julio de 2014 en su artículo 4 de los Vertimientos *“Si la totalidad de las aguas residuales tratadas se entregan para reúso no se requerirá permiso de vertimiento por parte del Usuario Generador y no habrá lugar al pago de la correspondiente Tasa Retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales. En caso contrario si la entrega es parcial, deberá ajustarse el cobro conforme a la modificación del Permiso de Vertimientos”* (MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2014).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar y analizar los impactos ambientales potenciales generados en el sistema de tratamiento de 1 m³ de agua potable y 1 m³ de agua residual que conforman el ciclo integral del agua del campamento el Cedral ubicado en la Central Hidroeléctrica Sogamoso, mediante la implementación de la metodología ACV.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y cuantificar los impactos ambientales potenciales generados en el ciclo integral del agua, desde el sistema de captación del agua (agua superficial y subterránea), seguido de la conducción, tratamiento del agua potable, distribución y consumo, como del tratamiento del agua residual doméstica y su respectivo vertimiento, con datos reales del campamento el Cedral.
- Aplicar el análisis de ciclo de vida desde un enfoque por atributos y comparativo, según la norma ISO14040 e ISO 14044, para el sistema de potabilización y aguas residuales domésticas, etapas del ciclo integral del agua del Campamento el Cedral.
- Plantear una tecnología de tratamiento para el reúso del agua producida en la planta de tratamiento de agua residual doméstica en el Campamento el Cedral.

4. MARCO DE REFERENCIA

La investigación se fundamentó en la revisión y extracción de información de tesis de maestrías y doctorados, estudios de municipios, libros, artículos científicos, normas, procedimientos e instructivos, sobre el ciclo integral del agua; sistemas de tratamiento de agua potable y agua residual y metodologías que permitieran verificar la falta de estudios a nivel nacional, sobre la evaluación de impactos ambientales potenciales generados en la captación, uso y disposición final del ciclo del agua, requerido en una central hidroeléctrica.

4.1. ESTADO DEL ARTE

La producción de energía hidroeléctrica (presas, centrales, canales, tuberías a presión, etc.) conlleva consumos energéticos apreciables en el ciclo integral del agua "CIA" (MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2015). El CIA abarca la completa y compleja labor del manejo de los sistemas que permiten la captación, el consumo, la reutilización, así como, el saneamiento de las aguas residuales generadas por su consumo. A continuación se destacan los estudios de mayor interés relacionados al ciclo integral del agua:

El estudio del CIA realizado por ESTEVAN (2007), estableció un modelo metodológico y configuró las bases de una herramienta de cálculo que permitieron obtener valoraciones aproximadas de los consumos energéticos y las emisiones asociadas al ciclo integral del agua urbana, mediante la metodología ACV. Estevan consideró el ACV desde la obtención del recurso hasta su depuración, incluyendo la utilización de agua y la obtención de agua caliente sanitaria (ACS); así como la cuantificación de la energía incorporada en la construcción y mantenimiento de las infraestructuras hidráulicas a lo largo de todo el ciclo y la energía consumida en el transporte y manejo del agua urbana, incluyendo los consumos energéticos para la producción del ACS y la energía incorporada en los reactivos utilizados en los tratamientos. Según los resultados, se determinó una contribución ambiental entre 8 y 10 Kg CO₂ por m³ de agua facturada, correspondiente a los costos energéticos de la operación del ciclo del agua, como de la construcción y mantenimiento de las infraestructuras hidráulicas de todo el ciclo. La producción de ACS representó entre el 65 y el 85% del consumo energético del

ciclo integral del agua urbana (6 y 7 kg de CO₂ de la emisión total) y la energía incorporada en las infraestructuras y reactivos representaron el 50% de la emisión total en el ciclo del agua fría debido al transporte a grandes distancias y con calidades deficientes del agua.

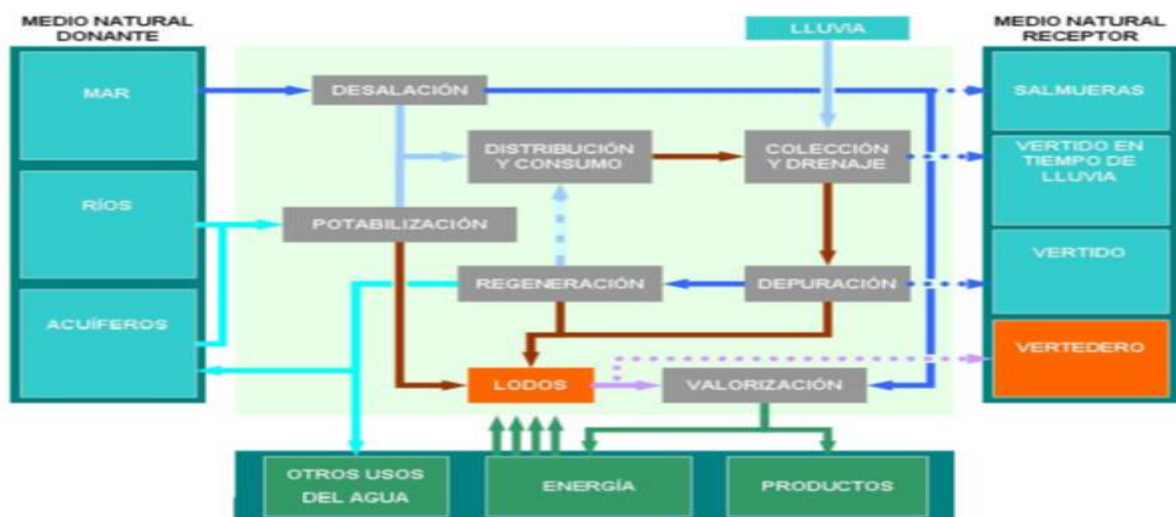
Otro estudio referente a la evaluación del impacto ambiental potencial asociado al ciclo integral del agua, fue realizado por RALUY RIVERA, (2009) en Barcelona. La finalidad del proyecto fue la evaluación de cargas ambientales aplicando diferentes tecnologías de producción de agua potable (desalación) y depuración de aguas residuales, determinando la de menor impacto para el entorno ambiental frente a la integración y suministro energético requerido.

Durante el Congreso Nacional del Medio Ambiente realizado en España FUNDACIÓN ECOLOGÍA Y DESARROLLO – ECODES, (2010) se presentaron propuestas enfocadas en aumentar la eficiencia energética en el uso del agua en entornos urbanos. La primera consistió en la descripción del consumo energético y las emisiones de GEI (gases de efecto de invernadero) asociadas a las etapas del CIA en el uso urbano. Un segundo eje temático fueron ejemplos reales desarrollados para ahorrar energía, disminuir y reducir los gases de efecto invernadero del CIA en el uso urbano. Y por último, una propuesta que permite identificar prioridades de intervención y recomendaciones de comunicación para mejorar la eficiencia energética del CIA. Las conclusiones de mayor relevancia fueron: se puede reducir el consumo energético a partir de un ajuste en la regulación del bombeo, reducción de fuga de agua, sustitución de depósitos de ruptura u optimización en el consumo de agua caliente; se determinó mediante un análisis exergético que los procesos de depuración y desalación, son poco eficientes energéticamente; las entidades responsables de abastecimiento y saneamiento del agua, deben monitorizar y mejorar los rendimientos de sus máquinas, procesos e incluso su capacidad de producción eléctrica a partir de micro-centrales, biogás producido en estaciones depuradoras o incluso energía solar.

En el Centro para el Desarrollo Técnico Industrial (CDTI) se realizó un estudio de evaluación de IAP asociados al consumo eléctrico en kWh, mediante la elaboración de una herramienta medio

ambiental dirigido por FLORES BADOS (2010). El estudio calculó los impactos del ciclo integral de agua con suministro de energía mix eléctrica de España y los impactos asociados mediante el uso de energías renovables. Las herramientas para la elaboración del ACV fueron el programa SimaPro® y la base de datos Ecoinvent v.1.3 y v.2©. Los resultados obtenidos en el ACV por kWh de energía y la cuantificación de las mejoras ambientales por m³ de agua que se produciría mediante la implantación de energías renovables, establecen la base para la toma de decisiones junto a los posteriores análisis de viabilidad tecnológica y económica. Así mismo, el estudio concluye que las características principales para que el ciclo integral del agua sea auto-sostenible son: el empleo de los recursos hídricos renovables de aguas superficiales y acuíferos; el empleo de la desalación como fuente complementaria del recurso; el suministro de agua para consumo humano con todas las garantías sanitarias; la máxima eficacia en la explotación de los recursos hídricos; la minimización del impacto de los vertidos al medio natural en tiempo de lluvia; la reducción de la contaminación vertida al medio; la reutilización del agua; reducción y valorización de los residuos; la reducción del consumo energético; aprovechamiento energético de los procesos del agua o sus residuos (ver **Figura 1**). De igual forma, se concluye que deben priorizarse en el futuro criterios medioambientales resultado del ACV como; la energía eólica, pequeñas instalaciones fotovoltaicas, cogeneración con biogás y cogeneración con biomasa por este orden.

Figura 1. Ciclo del Agua auto-sostenible.



Fuente: **FLORES BADOS Josep** Proyecto Sostaqua: desarrollos tecnológicos hacia el Ciclo Urbano del Agua Sostenible [Report]. - Barcelona: Centro Tecnológico del Agua - CETaqua, 2010.

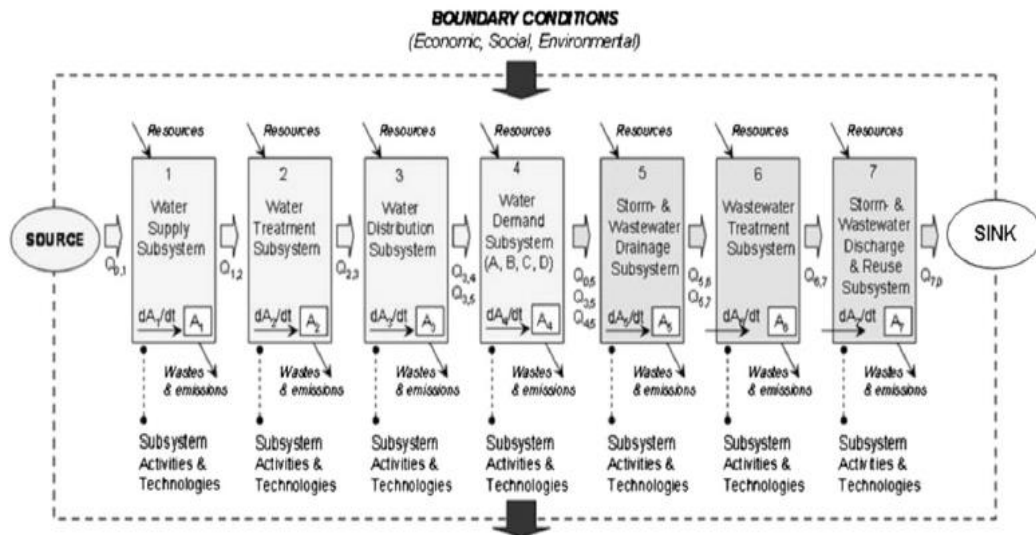
Según el estudio realizado por COBACHO (2010), se identificaron cuatro etapas claves de consumo energético para el suministro de agua urbana: presurización de la red en cabecera (exceso de energía que no se aprovecha, 16 horas/día de bombeo), transporte de agua por la red de distribución (dimensionado de las tuberías (46% disipación de agua por fricción de tuberías) o la existencia de fugas (16% agua fugada) aumentan las pérdidas energéticas), utilización de aljibes¹ domiciliarios y empleo de agua caliente en usos finales. Basado en estimaciones del ITA (Instituto tecnológico del agua de la UPV) sitúan el consumo energético del suministro de agua urbana en más de 3 kWh/m³ en el ámbito español (red sintética de una ciudad de 20.000 habitantes y 40 km de tuberías (inyección 1,6 hm³/año, consumo 1,3 hm³/año y rendimiento general del 77%)); concluyendo que un ahorro del 30% en el consumo de ésta supondría una reducción del consumo eléctrico total nacional del 2%; mientras que un estudio realizado por la Comisión de la Energía de California (EE:UU) cuantifican el consumo energético del ciclo completo del agua urbana de 5 kWh/m³, suponiendo casi un 20% del consumo eléctrico del estado y previendo que el ahorro energético derivado del ahorro de agua tendría un impacto dos veces mayor que el propio ahorro energético.

Un gran aporte que permite calcular las emisiones del GEI para el ciclo integral del agua fue emitido por el Centro Tecnológico del Agua a través del diseño de la calculadora de huella de carbono denominado **CAFCA**, orientado por la profesional MASSAGUÉ (2010). Es una aplicación informática que calcula el GEI derivado del funcionamiento de plantas de tratamiento de agua potable, plantas depuradoras, transporte y distribución de agua potable y residual; permitiendo identificar aquellas actividades con mayores emisiones asociadas y apoyar la toma de decisiones en el diseño o gestión de una instalación. Sus resultados revelan que el proceso del ciclo integral del agua, que emite directamente más GEI, es el tratamiento de fangos en las plantas depuradoras, que puede llegar a representar el 30% de las emisiones de una depuradora y el 70% restante procede de la emisiones indirectas asociadas al consumo de electricidad comprada de red, para las demás etapas del ciclo integral.

¹ Aljibes: es un recipiente total o parcialmente subterráneo, construido o labrado y cubierto por una bóveda de cañón o ligeramente apuntada o en cúpula de casquete, hecha de ladrillo que permite almacenar agua potable.

En Oslo (Noruega) se realizó el estudio a cargo de VENKATESH, et al., (2011) para el sistema de agua urbana desde el suministro de agua, como el tratamiento de aguas residuales, enfocados al consumo de energía eléctrica entre los años 2000 y 2006 (ver Figura 2). El consumo per capital de energía anual para el periodo evaluado, varió entre 220 y 260 kWh. El estudio no consideró el consumo de energía en las etapas de construcción y demolición. El software utilizado fue Simapro 7.1.5®, base de datos Ecoinvent y métodos de evaluación CML 2001. Los resultados establecen que la PTAR es el proceso que genera mayor impacto ambiental (88.2% del total), con un consumo de energía promedio de 0.8 kWh/m³, seguido por el tratamiento del agua cruda (5.4%), con un consumo de energía promedio de 0.4 kWh/m³ y la distribución del agua potable (3.45%). Por otra parte, la acidificación (62% contribución por las emisiones de dióxidos de sulfuro y óxidos de nitrógeno), la eutrofización (24%) y el calentamiento global (6%) resultaron ser los impactos ambientales más significativos.

Figura 2. Condiciones de Frontera



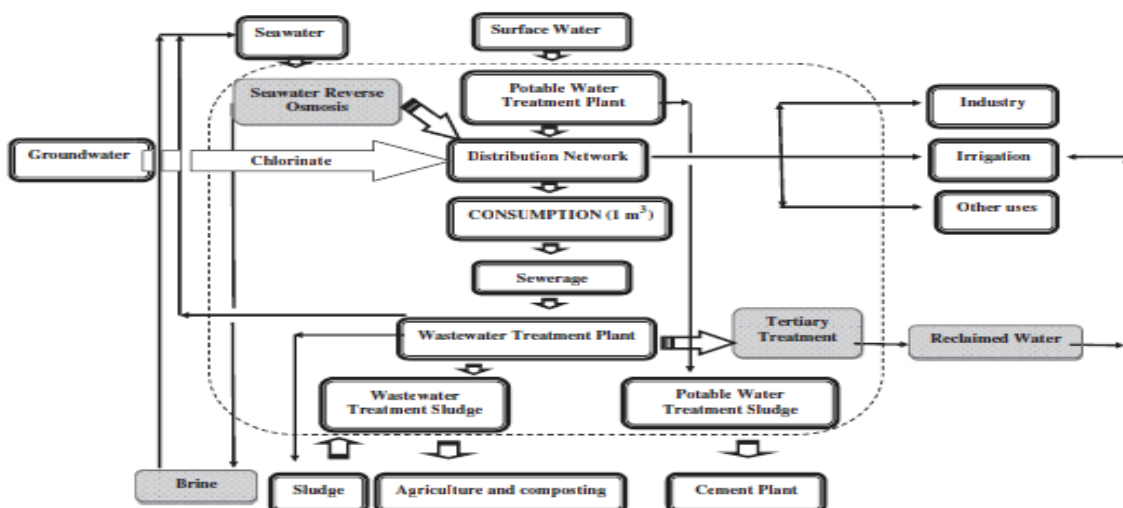
Fuente: VENKATESH G and BRATTEBO Helge. Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services. Case study of Oslo (Norway) [Journal]. ELSEVIER, 2011. 2 : Vol. 36.

En la ciudad de Zaragoza, UCHE, (2011) realizó un estudio que permitió evaluar el costo ambiental de reposición de masas de agua y la reducción del costo energético global de las tecnologías, a través de la evaluación ambiental del todo el ciclo integral del agua. Los resultados reportaron que el 60% del impacto total se debió al consumo de energía utilizado para la producción de agua caliente sanitaria en las viviendas. Adicionalmente, se concluyó que

el consumo de electricidad del ciclo global fue del 7% de la demanda total de la energía de España (referente al suministro, captación, abastecimiento y tratamiento del agua, más del 50% del consumo). En relación con las necesidades de energía, se aplican nuevas tecnologías, como la desalación y la reutilización, que son consumidoras de energía en notable medida.

Una contribución relevante fue el estudio realizado por AMORES, et al., (2012) en la evaluación de las etapas de extracción y tratamiento de agua, distribución del agua potable, recolección del agua residual, tratamiento y disposición del agua residual y administración; cuya unidad funcional fue 1 m³ de agua tratada en Tarragona, ciudad española. Para la evaluación de impactos se utilizó el software Simapro, la base de datos Ecoinvent y el método CML 2001. El estudio determinó que la mayor contribución ambiental se debe al consumo de energía eléctrica, principalmente la etapa de extracción y tratamiento de agua que es influyente en la mayoría de las categorías de impacto. La etapa de tratamiento y disposición del agua residual fue la más influyente en dos impactos relacionados con la eutrofización marina y la ecotoxicidad marina. Finalmente se propusieron cinco escenarios de mejoramiento ambiental basados en aspectos como: la reducción de pérdidas en la red de distribución a distinta escala, la reducción de la infiltración de agua a la red de alcantarillado, la modificación del mix de electricidad de Portugal y la disminución de la concentración de nitrógeno en el agua residual tratada.

Figura 3. Ciclo Integral del Agua con agua regenerada y de ósmosis inversa de agua de mar.



Fuente: AMORES María. Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. [Journal]. - España : ELSEVIER, 2012. - Vol. 43.

Para este mismo año QI, et al., (2012) estudiaron el ciclo urbano del agua en el Sur de La Florida, con base en la comparación de tres escenarios: Situación actual, reciclaje de agua y escasez. Para el caso de la situación actual, concluyeron que la distribución, el bombeo de agua y el tratamiento de aguas residuales son las tres actividades que más impactos ambientales causaron en el ciclo (35.2%, 20.5% y 13.8% respectivamente); las categorías de impacto más afectadas fueron el potencial de eutrofización y el ecosistema de agua dulce. El escenario denominado *reciclaje de agua* no implicó un mejoramiento significativo de los indicadores de impacto, excepto por el caso del consumo de agua dulce, el cual se vio reducido por una menor extracción del recurso. El escenario de escasez representó el deterioro de todos los indicadores de impacto con respecto al escenario de reciclaje de agua.

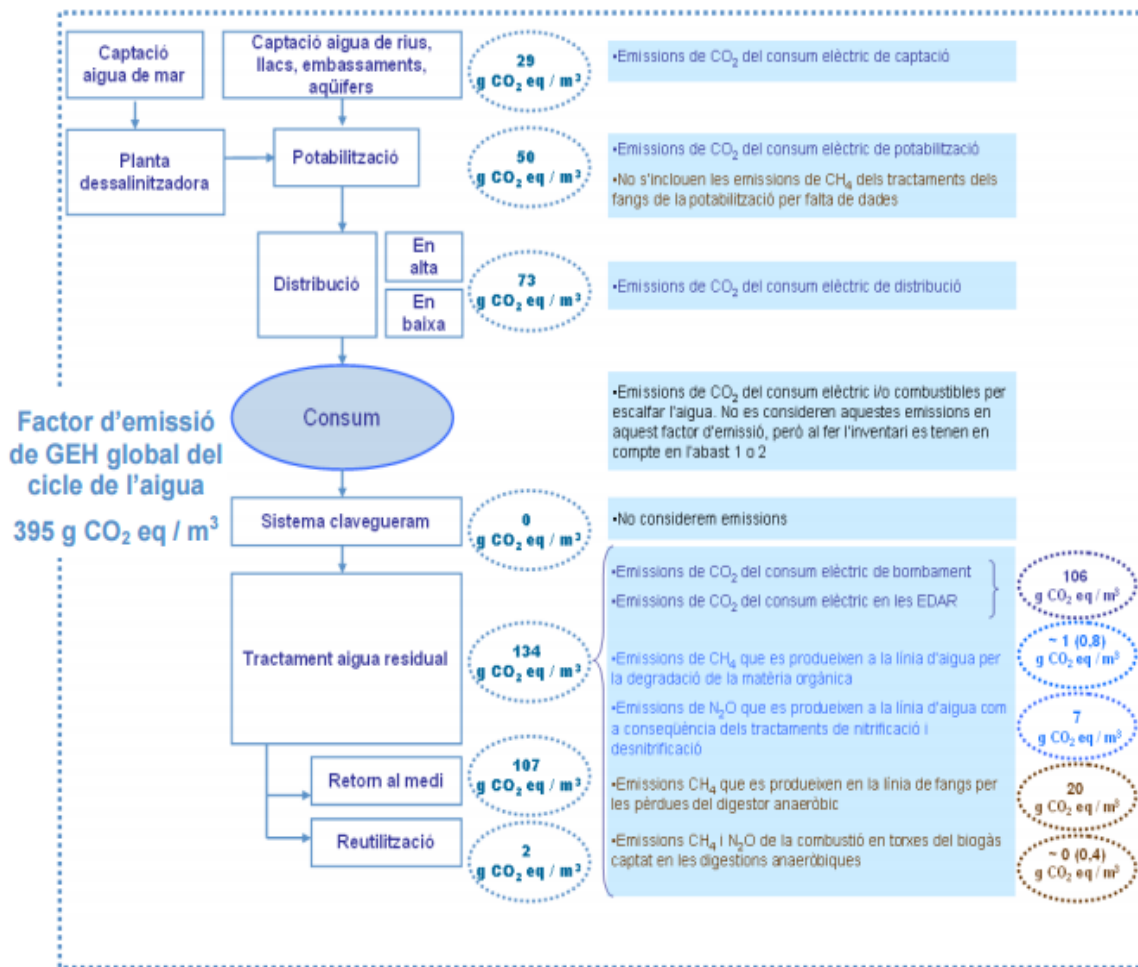
A través de los estudios y la gestión ambiental realizada por la EMPRESA METROPOLITANA DE ABASTECIMIENTO Y SANEAMIENTO DE AGUAS DE SEVILLA EMASESA, (2013), se obtuvieron diferentes logros entorno al ciclo integral del agua de 5 embalses de capacidad de 580 Hm³ y 3558 km de red de abastecimiento, tales como: inventario de GEI (ISO 14064-1) que suponen un total de 26000 toneladas CO_{2eq} y una huella de Carbono global de 0.3 k CO_{2eq}²/m³ de agua utilizada; reducción del consumo energético del 4% (> 2200 MWh/año) a través de la producción > 35000 MWh/año en mini-centrales y por cogeneración, con una autosuficiencia del 68%; prevención de contaminación del cauce superando la normatividad en 1050 toneladas de materia orgánica; reducción de consumo de agua embalsada en 90.5 hm³ en 2010 a 82.7 hm³ en 2013 y reutilización de 3599 dam³.

Otro aporte fue realizado por LEMOS, et al., (2013) en el municipio de Aveiro (Portugal), a través de la metodología de ACV para 1 m³ de agua potable (consumo de 4350000 m³ en el 2008). La evaluación de impactos incluyó las etapas de captación y tratamiento de agua, distribución, sistemas de recolección y tratamiento de agua residual, disposición y administración del agua producida. El método de evaluación utilizado fue el ReCiPe 2008. Al igual que los resultados obtenidos por AMORES, et al., (2012) se ratifica que la etapa de

² CO_{2-eg}: es la cantidad de emisiones de CO₂ que causarían el mismo forzamiento radiactivo que la cantidad emitida de un gas de efecto invernadero bien mezclado o una mezcla de gases de efecto invernadero bien mezclados, todo multiplicado con sus respectivos PCM para tener en cuenta los diferentes tiempos de permanencia en la atmósfera.

extracció de aigua y el tractament són els processos més rellevants en la evaluació de les categories d'impacte (39%-45%), pues tenen major consum de electricitat; seguit de la PTAR (29%-38%) y finalment la distribució y recolecció de aigües (20%-25%). Per a la categoria eutrofització y ecotoxicitat marina, l'etapa de tractament y eliminació de aigües residuals generaren tota la càrrega, degut a la lliberació de nitrogen y fòsfor en el mar (98% impacte total); a més, el consum de electricitat y la descàrrega de nutrients al mar foren identificats com els majors contribuïents a tots els impactes ambientals. El canvi climàtic se ve afectat per les emissions de CH₄ generades per disposició de lodos en la PTAR representat per 27% del impacte de l'etapa y el 10% del impacte total.

Figura 4. Ciclo Integral del Agua en Cataluña.



Fuente: OFICINA CATALANA DEL CAMBIO CLIMATICO - OCCC CÀLCUL DE LES EMISSIONS DE GEH DERIVADES DEL CICLE DE L'AIGUA DE LES XARXES URBANES A CATALUNYA [Informe]. - Catalunya : Direcció General de Polítiques Ambientals y la Agencia Catalana del Agua (ACA), 2015.

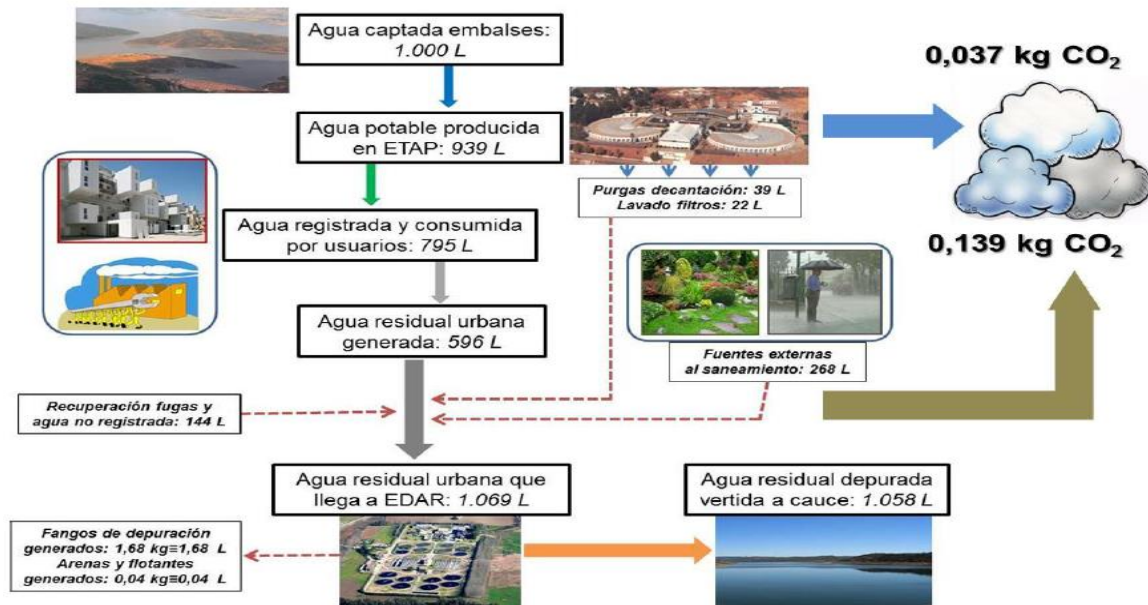
En relación a los estudios realizados por la OFICINA CATALANA DEL CAMBIO CLIMATICO – OCCC, (2015) las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al ciclo integral del agua de las redes urbanas, se han reducido cerca de un 60% desde 2007. El último año evaluado fue el 2013 cuyas emisiones vinculadas a este ciclo fueron cerca de 300.000 toneladas de CO₂ (395 gramos de CO₂ por cada m³ agua consumida en 749 hm³ de agua urbana al año) mientras que para el 2007 fueron de 520.000 toneladas. De todos los factores de emisión estimados en cada etapa del ciclo, los que tienen más impacto son el del tratamiento del agua residual, que emite 134 gramos de CO₂ por m³, básicamente por el consumo eléctrico del bombeo y de las estaciones depuradoras, y el del abastecimiento de agua (captación, potabilización y distribución), que emite 159 gramos de CO₂ por m³.

En Colombia se realizó el primer estudio de caracterización de IAP al ciclo del agua en la ciudad de Pereira, a cargo de VARÓN HOYOS, (2015) bajo la metodología de análisis de ciclo de vida con datos del año 2012 y soportado con el software Simapro 8.0.2 y el método Impact 2002+. El análisis estableció tres escenarios a partir del cambio en el consumo de agua potable y/o en la cantidad de contaminantes que contiene el agua residual que se dispone en el río Otún, luego de ser recolectada y transportada. El estudio concluyó en que el agua potable (como producto) contribuyó con el 98% (en promedio) del impacto potencial de punto medio, en 11 de las 15 categorías estudiadas. Así mismo, la mayor parte del impacto potencial de punto final (54,47%) fue causado por el agua potable; el *tratamiento* fue la fase que más contribuyó a los IAP de punto medio (83,41% en promedio en 10 de las 15 categorías estudiadas). La *disposición final* fue la etapa que más influyó en el daño total potencial (45,65%). Finalmente se determinó que el agua para uso doméstico presentaría una reducción del daño potencial total de 20,00% si se redujera el consumo de agua en 20%. Sin embargo, si solamente se redujeran los contaminantes del agua residual en 80% y al mismo tiempo la reducción del consumo de agua en 20%, el daño total potencial del ciclo de vida disminuiría en el 11,05%.

Bajo la necesidad de conocer y evaluar los flujos de materias asociados al ciclo integral del agua como forma de avanzar en la gestión eficaz y responsable en la ciudad de Córdoba, España (embalse de Guadalmeñato, 147 hm³ a 25 km de la ciudad), realizaron el ciclo de vida

desde el 2010 al 2014 bajo la dirección de GALVÍN, (2015). Las emisiones relacionadas se deben principalmente al gasto energético que se produce en la potabilización y depuración de aguas residuales como se visualiza en la **Figura 5** (MASSAGUÉ, 2010).

Figura 5. Ciclo Integral del Agua en Córdoba.



Fuente: GALVÍN Marín. El ciclo integral del Agua en Córdoba. Flujos de materia implicados y huella de Carbono asociada. [Conference] // IV Jornada de Ingeniería del Agua. La precipitación y los procesos erosivos de Córdoba.. - Córdoba : DIA, 2015.

Los resultados obtenidos permitieron determinar que el sistema de potabilización genera una emisión del 3,9% y un 2,2% sobre caudal de entrada, respectivamente, purgas de decantación y aguas de lavado de filtros: las primeras con un contenido más alto en sólidos y carga biodegradable, así como de metales pesados (9,0 kg/d vs 1,6 kg/d). Así mismo, la carga aportada al saneamiento por estos efluentes fue del 11,24% sobre el total de agua residual en sólidos y sólo el 1,13% de carga biodegradable. Con respecto a los subproductos de depuración, se generan 126 T/d de fangos de depuración con calidad para aprovechamiento agrícola, y 3 T/d de arenas y aceites-grasas. Finalmente, la huella de carbono asociada al ciclo integral del agua en la ciudad, supuso la emisión de 15,2 kg/año de CO₂ por h, con un costo energético de 0,102 KWh/m³ en potabilización y de 0,390 KWh/m³ en depuración.

4.2. MARCO TEORICO

En relación a los resultados presentados en la revisión del estado del arte, se establece que un sistema cíclico de agua puede reducir el consumo de recursos hídricos, disminuir la descarga de aguas tratadas en otros cuerpos de agua y recuperar los nutrientes de las aguas residuales a ser vertidas (LIM, et al., 2010). Es así que la implementación de sistemas cíclicos de manejo del agua urbana debe enfocarse en el suministro de agua para usos domésticos e industriales (VERSTRAETE, et al., 2009).

El ciclo del uso humano del agua es uno de los principales consumidores de energía, puesto que todas las fases que lo integran requieren de la misma para su funcionamiento (proceso unificado e interconectado de su principio a fin). Los tres parámetros físicos básicos que determinan los consumos energéticos a lo largo del ciclo de agua son el volumen, calidad y temperatura (BALLESTEROS, 2010).

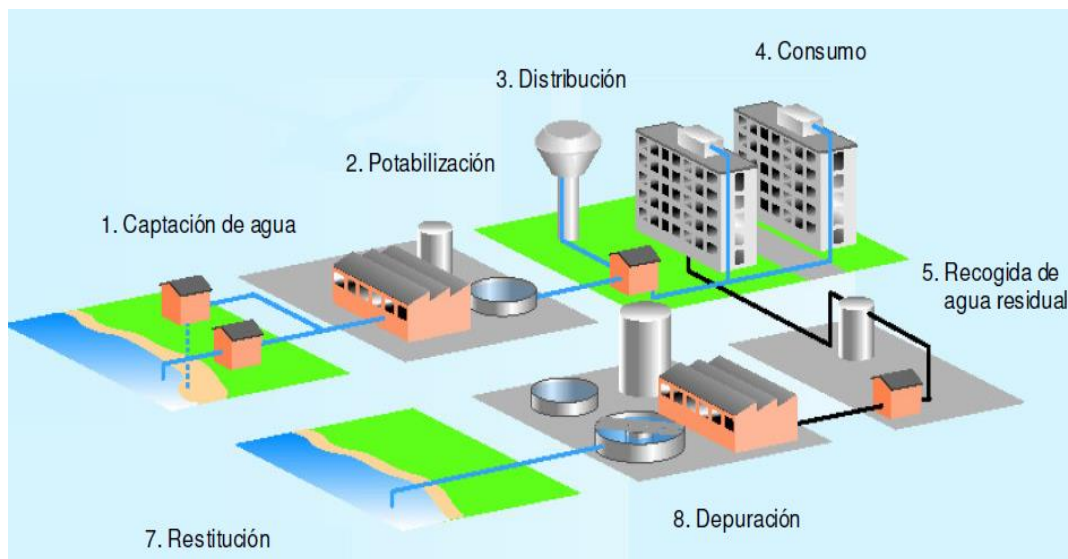
4.2.1. Ciclo Integral del Agua. El Ciclo Integral del Agua (CIA) pone en conexión los ciclos naturales para cualquier industria, aportando un recurso natural necesario que inicia con la captación del agua (fuente superficial o subterránea) e incluye el tratamiento del agua potable hasta regresar al sistema en forma de agua residual a los cauces públicos (descarga de las aguas residuales tratadas a los ecosistemas acuáticos y la incineración o disposición final de los lodos, bien sea en rellenos sanitarios o en suelos agrícolas) en condiciones controladas (BASANTA ALVES, 2014) (LEE, et al., 2012) . Es importante destacar la contribución al uso eficiente de la energía, el control de las emisiones del gas de efecto de invernadero, la valorización de los residuos en materia orgánica y/o nutrientes.

El CIA inicia desde que el recurso se capta de la cuenca hídrica y llega al punto de consumo, donde es usado, para su posterior retorno al medio de captación o en su defecto a procesos de reutilización (MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2015).

En la **Figura 6** se presentan las fases que integran el ciclo del agua. Las etapas consideradas en el ciclo integral del agua son:

- **Abastecimiento:** El agua es captada de fuentes hídricas (ríos, pozos, embalses, etc.), se regula y almacena para su uso. Esta es transportada desde su origen a las áreas urbanas para ser tratada (sistema de potabilización) y asegurar las condiciones de sanidad.
- **Distribución:** El agua tratada, apta para consumo humano se almacena en tanques especiales y es conducida por tuberías de transporte (canales principales y secundarios) y redes malladas hasta llegar a las acometidas y contadores respectivos, para los usos domésticos, industriales y de regadío (plantas potabilizadoras en usos domésticos y redes de distribución en baja).

Figura 6. Fases del Ciclo Integral del Agua.



Fuente: CASARES Carolina Curso de Formación de Formadores: Gestión del Agua - Ciclo Urbano del Agua [Report]. - Madrid, España. : BESEL S.A., 2006.

- **Saneamiento:** es el manejo sanitario del agua potable y aguas residuales provenientes del sector doméstico, industrial, entre otras, que son captadas y devueltas al cauce natural (servicios de recogida (alcantarillado), tratamiento de agua (plantas de depuración) y vertido de aguas residuales urbanas.

- **Alcantarillado:** las aguas una vez usadas, producidas y vertidas por los diferentes sectores son recolectadas de forma conjunta a través de tuberías para su transporte hacia los sistemas de depuración y vertido.
- **Depuración:** las aguas residuales se depuran mediante procesos físicos, químicos y biológicos, para luego ser vertidos a los cauces naturales en condiciones de salubridad respecto a la legislación ambiental vigente. Los subproductos obtenidos en la depuración son convertidos en productos inocuos o aprovechables (abonos, fertilizantes, etc.).

4.2.1.1. Captación del agua. El sistema de bombeo se lleva a cabo desde recursos superficiales o subterráneos. El agua es bombeada desde las fuentes superficiales o subterráneas, y transportados a la PTAP. El transporte del agua se realiza a lo largo de acueductos y tuberías hasta los puntos de tratamiento (POCH BARRERA, 2013).

4.2.1.2. Potabilización. La potabilización del agua se lleva a cabo para asegurar las adecuadas condiciones sanitarias y aptitud para el consumo humano. Las PTAP se alimentan de agua natural del embalse y producen a la salida “agua apta para consumo humano”, es decir, son las responsables de suministrar el agua en perfectas condiciones sanitarias. Las sustancias no deseadas que se eliminan del agua se concentran como fangos y se someten a un tratamiento adecuado, aprovechándose en algunos casos para el relleno de canteras o como material de construcción. Se llevan a cabo procesos físico-químicos y se aplican técnicas para alcanzar la eficiencia en el consumo energético, en el empleo de reactivos químicos, en las aguas de lavado y en la inertización de los lodos resultantes. (MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE., 2011).

Desde el punto de vista del control de la calidad, los parámetros que se determinan son agentes biológicos, químicos o físicos que se controlan en el agua de consumo para conocer la calidad de esta. Usualmente se controlan (por el SINAC) 53 parámetros oficiales que nos indican si un

agua de consumo podría tener un riesgo para la salud, en el caso de sobrepasar unos determinados valores señalados en la legislación.

4.2.1.3. Distribución. Es la fase por el cual el agua “apta para consumo humano” se almacena en depósitos urbanos y se conduce por tuberías de transporte y reparto que se conforman en complejas redes malladas hasta llegar a las acometidas y contadores de los edificios o de las viviendas. Se emplean, en su operación y mantenimiento o conservación, complejos modelos informáticos de simulación de redes (apoyados en GIS) para estimar y conocer caudales y presiones de la red urbana de tuberías; técnicas para la reducción de fugas (mediante geófonos, correladores y otras técnicas avanzadas); se emplean georradars para la detección de la posición de las tuberías antiguas y balizas electrónicas para la localización de las nuevas; se elaboran planes de renovación (selección y priorización) de conducciones y se emplean caudalímetros electrónicos e inteligentes, y sistemas de tele-lectura a distancia de los mismos (CASARES, 2006).

4.2.1.4. Consumo. La conservación del agua durante el consumo debe estar contenida bajo los programas de educación, políticas del consumidor, legislación y normativa ambiental, con el fin de dar el máximo aprovechamiento a este recurso, como son: dispositivos ahorradores de bajo consumo, campañas de racionamiento, reutilización de aguas de lavado, uso de aguas lluvias, entre otras.

Cabe resaltar que los factores que influyen en la disminución del consumo de agua son el volumen consumido en la potabilización, el aumento de los precios hasta niveles próximos al costo de prestación del servicio, la extensión de la facturación por medición del agua consumida a la práctica totalidad de los usuarios, el riego de las grandes zonas verdes de nueva creación mediante pozos, la eliminación de las cámaras de descarga para la limpieza del alcantarillado, las mejoras en la conservación de la red de distribución, etc. (BENITO DÍAZ, 2011).

4.2.1.5. Recolección de agua residual. Es la fase por la cual las aguas ya usadas o utilizadas, producidas por las viviendas, comercios e industrias urbanas, se recogen, de manera conjunta o separada de las aguas de lluvia, a través de tuberías para su transporte. En la operación y conservación del alcantarillado, el empleo de técnicas informáticas de apoyo y optimización de tareas de limpieza y de conservación, preventiva y correctiva de las infraestructuras (tubos, colectores, pozos de registro) y la búsqueda de la eficiencia en estas labores ayudan en las tareas principales de los operadores. Tecnologías como la revisión robotizada (cámaras ópticas autodesplazables por colectores no visitables), la resolución de averías o deterioros con robots dirigidos a distancia o las técnicas de re-piping (encamisados de viejas tuberías existentes) son cada vez más empleadas (POCH BARRERA, 2013).

4.2.1.6. Depuración. El agua residual recogida se depura en complejas infraestructuras gracias a procesos físicos, químicos y, sobre todo, biológicos, y se vierte a los cauces naturales en óptimas condiciones para preservar las condiciones naturales del medio ambiente. Las plantas de tratamiento de agua residual o depuradoras (PTAR) recogen las aguas fecales o sucias y las transforman en agua limpia apta para su devolución al sistema fluvial. Las sustancias no deseadas se extraen y concentran como fangos, y deben ser tratados para estabilizar e higienizar la materia orgánica que contienen (CASARES, 2006).

La eficiencia en el consumo energético es trascendente, dado el importante consumo de estas plantas y el aseguramiento de las calidades, tanto de los efluentes como de los fangos (aprovechables como fertilizantes o enmiendas orgánicas, o como combustibles de baja capacidad calorífica) requieren un control industrial (calibración de instrumentos) y de laboratorio muy sofisticado y profesional.

4.2.1.7. Restitución. El agua que previamente ha sido depurada en las plantas de tratamiento de agua residual y que no se aprovecha, se reintegra al medio natural (ríos, mar, etc.) a través de conducciones especiales o emisarios submarinos y procurando alterar lo mínimo posible los

sistemas naturales donde desembocan, cerrándose de este modo el ciclo integral del uso del agua.

4.2.2. Sistema de Tratamiento de Agua Potable. El sistema de potabilización se realiza para asegurar las condiciones sanitarias para el consumo humano. Este sistema es responsable de suministrar el agua en perfectas condiciones, donde las sustancias no deseadas del proceso se eliminan y dan un tratamiento óptimo para ser utilizados los productos obtenidos. Los procesos realizados en este sistema utilizan fenómenos fisicoquímicos mediante la aplicación de técnicas que permiten alcanzar la eficiencia en el consumo energético, consumo de reactivos químicos, entre otros. (MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2015).

A través del software LCAqua, MOHAPATRA, et al., (2002) permitió evaluar los IAP de una planta de Tratamiento de agua convencional usando el método de filtración con carbón activo “**GAC**” versus la integración de la tecnología de ósmosis, obteniendo similar consumo en recursos energéticos y mayor impacto en el consumo de químicos (regeneración del GAC). Así mismo, la comparación de diferentes técnicas de desinfección: radiación Ultra violeta, cloro e inyección de hipoclorito para PTAP y PTAR, con los métodos CML en el software GABI, determinan que se presenta mayor impacto ambiental potencial en la técnica de radiación UV debido al alto consumo energético (BEAVIS, et al., 2003).

Otro estudio realizado por TARANTINI, et al., (2001) para un sistema de abastecimiento de agua potable utilizando el método CML, determinó que los impactos potenciales (uso de recursos, ecotoxicidad acuática y acidificación) se deben al alto consumo de energía eléctrica (90 kWh*persona*año) en el sistema de bombeo.

4.2.2.1. Desarenador. Estructura en la cual se logra eliminar mediante la sedimentación las arenas, gravas, barro y otros agentes presentes en el agua captada. Por lo general, el desarenador se localiza cerca de la captación con el objeto de que las partículas removidas no

ocupen espacio en la aducción disminuyendo así su capacidad de transporte de agua. La intensidad de la operación y el mantenimiento se harán de acuerdo con la dinámica del sistema y se llevará en registro las acciones y observaciones, con el objetivo de tomar acciones que optimice la labor misma de operación y mantenimiento (SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE - SENA., 2012).

4.2.2.2. Aducción/conducción. Se efectúa mediante una tubería que conduce el agua que sale del desarenador hasta la planta de tratamiento o tanque de almacenamiento, en caso de no existir tratamiento. El mantenimiento preventivo se realiza mediante la inspección de la línea de aducción con el objetivo de detectar puntos de riesgo, como derrumbes, hundimientos, etc.

4.2.2.3. Aireación. Consiste en favorecer el contacto del agua con el aire ambiente con el propósito de oxigenar el agua o eliminar gases presentes en ella que podrían llegar a afectar los siguientes procesos o que producen olores y sabores en el agua.

4.2.2.4. Dosificación. Consiste en la acción de agregar a todo el caudal una cantidad exacta de una sustancia química, predeterminada mediante ensayos, con el fin de obtener unos resultados definidos después de cada proceso. El coagulante es un producto químico que se agrega al agua con el propósito de producir desestabilización y aglutinación de los sólidos en suspensión en el agua. Los ensayos que se realizan para determinar la dosis de coagulante a agregarle al agua son los "ensayos de jarras" o de dosis óptima.

4.2.2.5. Mezcla rápida y coagulación. El coagulante agregado a todo el caudal de agua cruda debe mezclarse rápidamente. Para lograr la coagulación se requiere de una agitación vigorosa del agua. Además se debe generar turbulencia en el flujo para lograr el efecto esperado. El coagulante reacciona con el agua inmediatamente es agregado, se produce hidrólisis,

desestabilización de las partículas coloidales (en suspensión) y formación' de microfloc (pequeñas aglomeraciones de partículas desestabilizadas), en este orden.

4.2.2.6. Floculación. Se realiza por medio de la agitación lenta del agua, que se lleva a cabo para aglutinar partículas más pequeñas en grandes denominadas FLOC'S, para que puedan ser removidos fácilmente por sedimentación. Después de que el coagulante se ha mezclado y coagulado en el agua empiezan a adherirse y aglutinarse las partículas difíciles de sedimentar dando lugar a la formación de "flocs". Para que dichos "flocs" aumenten de tamaño y adquieran el suficiente peso que les permita sedimentar, es necesario someter al agua a una agitación lenta durante un tiempo preestablecido. El periodo de retención debe estar entre 30 y 60 minutos. La velocidad de agitación no debe ser tan alta que rompa el flóculo ni tan baja que permita la sedimentación en el floculador (SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE - SENA., 2012).

4.2.2.7. Decantación. A través de ella separamos el agua de los FLOC'S los cuales se decantan en el fondo de los tanques de sedimentación. Con la sedimentación se produce la clarificación del agua.

4.2.2.8. Filtración. Este mecanismo hace que las partículas de turbidez que no fueron retenidas en la sedimentación, sean totalmente eliminadas. La filtración es una de las principales operaciones que se realizan en toda planta de tratamiento, hay varios objetivos que se logran a través del proceso de filtración y conviene conocerlos. Los objetivos fundamentales de la filtración:

- Remoción de bacterias. La eficiencia en este aspecto depende de la granulometría de la arena (tamaño de los granos de la arena; entre más fina sea esta, mayor será su eficiencia).
- Remoción de la turbiedad remanente (que permanece). (SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE - SENA., 2012).

4.2.2.9. Desinfección. Consiste en la aplicación directa al agua de sustancias químicas o en la utilización de medios físicos para eliminar de ella agentes patógenos, capaces de producir infección o enfermedad en el organismo del ser humano. Con ella, adicionamos la cantidad de cloro necesaria para destruir los microorganismos que puedan estar presentes en el agua.

4.2.3. Sistema de Tratamiento de Agua Residual. El saneamiento de aguas residuales en América Latina carece de una infraestructura adecuada (solo se trata el 20% de aguas residuales recolectadas), es por eso que el proyecto realizado por NOYOLA ROBLES, et al., (2013) aportó una contribución a la gestión sustentable del agua y a la reducción de las emisiones de efecto de invernadero generadas en el sistema de tratamiento de 1 m³ de aguas residuales en América Latina y el Caribe (considerando tres flujos diferentes de tratamiento: 13l/s, 70 l/s y 620 l/s, para una población servida de 7000, 38000 y 335000 habitantes), basados en la cuantificación de emisiones bajo lineamientos del análisis de ciclo de vida desde el punto de vista técnico, económico, social y ambiental. Los resultados obtenidos determinaron que las PTAR existentes en su mayoría son pequeñas con tecnologías de lagunas de estabilización³, que representan el mayor potencial de GEI si se cubren y captura el biogás.

La distribución de agua y el tratamiento de agua residual generan mayor impacto ambiental que el mismo proceso de tratamiento de agua potable, debido al consumo de químicos, uso de energía y la disposición de lodos según el estudio realizado por LUNDIE, et al., (2004) utilizando el método CML y el software GABI. Algunos aspectos considerados relevantes para la identificación y cuantificación de IAP mediante el ACV comparativo en dos PTAR (sistema de lodos activados con aireación extendida más sedimentador secundario y un sistema natural por lagunas anaerobia seguida de facultativa, ambas con tratamiento preliminar) ubicadas en el Valle del río Cauca (Colombia), se presentan en el estudio de (ZAMBRANO, et al., 2007).

³ Las lagunas de estabilización se entienden como sistemas de tres lagunas en serie (anaerobia, facultativa y pulimento).

El estudio permitió establecer criterios para obtener un menor impacto posible en el tratamiento de 1 m³ de agua residual doméstica con la limitante de la carencia de información (pocos estudios de caracterización de lodos y emisiones al aire) y el establecimiento de factores de emisiones asociados a las condiciones locales. Los sistemas estudiados tienen un potencial de eutrofización similar, aunque el sistema de tratamiento de lodos activados presenta mayores consecuencias ambientales debido al alto consumo energético, afectando la categoría de calentamiento global.

La PTAR debe medir la cantidad de contaminantes eliminados, el volumen de agua tratada así como la cantidad de lodo resultante. Algunas consideraciones del ACV en una PTAR son GASSÓ, (2011):

- La etapa de construcción es responsable del 25% al 35% del potencial de calentamiento global de una PTAR.
- El funcionamiento de la instalación se considera mucho más relevante para el resto de las categorías
- El impacto de la etapa demolición/desmantelamiento se ha encontrado que es prácticamente insignificante.
- Las tecnologías de lodos activados generan mayor impacto ambiental.
- Se pueden usar lodos como combustible para gasificación y producción de electricidad con biogás (CHERMICHAROL, 2010).

Los impactos de la depuración de aguas sobre el medio ambiente global según GONZALEZ BENITEZ, et al., (2013), podría considerarse que el impacto global decrece cuando el grado de tratamiento de las aguas residuales se incrementa, debido al menor impacto sobre la acidificación y la eutrofización. Lo anterior obedece a:

- El consumo de energía es el apartado con mayor impacto ambiental global.
- La descarga del efluente tratado en la PTAR es la máxima responsable de la eutrofización (98-99%).

- La aplicación del fango en el terreno es la mayor responsable de la ecotoxicidad (98-99%) por la presencia de metales pesados y de la acidificación (56-65%) por las emisiones de NH_4^+ .

Sin embargo, una de las alternativas que busca la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales es la captura del biogás y la generación de electricidad en las lagunas de estabilización, según explica el proyecto Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo (IDRC (2011)), al igual que la generación de energía en el sistema UASB seguido de un post tratamiento de menor impacto.

- Procesos consumidores de energía:
 - Desbaste
 - Extracción de espumas y fangos.
 - Recirculación
 - Secado térmico o incineración de fangos
 - Aireación
- Proceso generador de energía
- Cogeneración con gas de digestión (rico en CH_4)

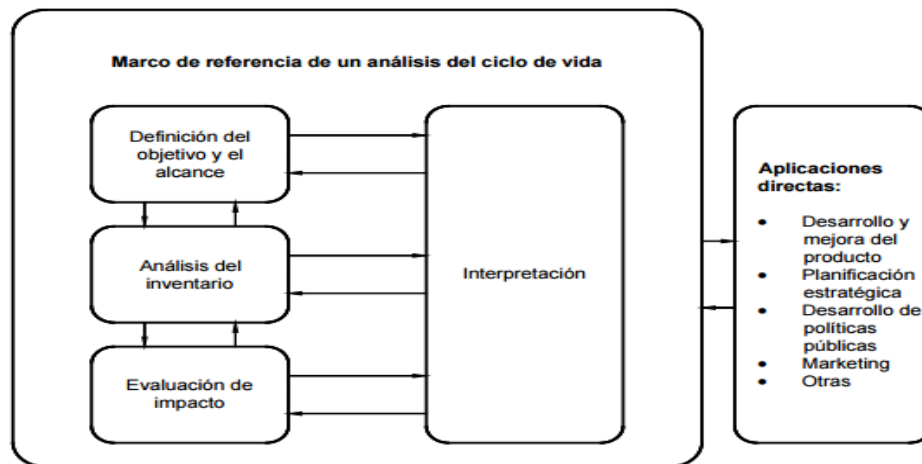
4.2.4. Estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). La metodología más aplicada en la industria para la identificación, evaluación y análisis de impactos ambientales potenciales es el Análisis de Ciclo de Vida (RECKMANN, 2012). Esta metodología asocia todos los impactos de los recursos utilizados durante el ciclo de vida de un producto o servicio. (BAUMANN, et al., 2004) (INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION., 2007).

El impacto ambiental potencial es considerado como el efecto generado en el medio ambiente por una acción, obra o labor industrial, el cual debe ser identificado, minimizado y mitigado para el desarrollo de cualquier proceso con el menor grado de perturbación SANZ CONTRERAS, (1991). Actualmente existen diferentes metodologías que permiten valorar los impactos ambientales, en donde las estimaciones obtenidas por las mismas, proyectan las consecuencias ambientales para el análisis en la toma de decisiones (KURNIAWAN, et al.,

2011). En el **Anexo A** se incluyen los términos y definiciones requeridos en el ACV para su mejor comprensión.

El análisis de ciclo de vida se debe hacer por etapas: definición de objetivos y alcances, análisis del inventario, evaluación e interpretación del impacto que conllevan al desarrollo y mejora del producto, planificación estratégica y de políticas públicas (GASSÓ, 2011). Esta herramienta es regulada bajo una serie de normas ISO 14040 e ISO 14044.

Figura 7. Fases del Análisis de Ciclo de Vida.



Fuente: INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. Norma: ISO 14040 // Environmental Management – Life cycle assessment – Principles and framework.. - Bogotá D.C. : ICONTEC, 2006.

A continuación se enuncia una breve descripción de las cuatro etapas que integran el ACV: **a) Definición de objetivos y alcance:** se establecen los sistemas a analizar, sus límites y la unidad funcional (base de comparación entre los sistemas). La norma ISO 14044 establece que la unidad funcional es una unidad de referencia que asegura que los resultados del ACV son comparables al evaluar sistemas diferentes, es decir, una cantidad de producto equivalente para los diferentes escenarios (INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION., 2006)

b) Inventario de Ciclo de Vida (ICV): consiste en la compilación (especificación de elementos, compuestos y sus concentraciones) de todas las entradas y todas las salidas de los sistemas a evaluar.

c) Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida (EICV): consiste en identificar y modelar los daños ambientales generados por todos los compuestos, energía y emisiones (al aire, agua y suelo), cuantificados en el ICV.

d) Interpretación: Se evalúa en consonancia los resultados obtenidos en las fases anteriores con los objetivos definidos en el estudio para poder obtener las conclusiones finales.

La evaluación del ciclo de vida describe no solo la evaluación del comportamiento medioambiental de un producto sino que resalta total atención el consumo de energía requerido a lo largo de la vida útil del producto al igual que el uso de agua, materia prima principal en cualquier proceso o servicio. Esta evaluación permite promover la toma de decisiones según los resultados emitidos en la evaluación del inventario, para posteriormente hacer cualquier tipo de intervención a nivel del proceso o entorno ambiental, sin dejar a un lado la importancia del uso de agua (BERGER, et al., 2010).

4.2.4.1. Métodos de Cálculo. La evaluación de impactos ambientales se realiza bajo la aplicación de diferentes metodologías dependiendo de la necesidad del estudio y del marco general a evaluar. Existen a nivel científico diferentes metodologías de aplicación. En el Anexo B se indican de manera esquemática las metodologías más importantes de evaluación de impactos en la evaluación del inventario de ciclo de vida “EICV” disponibles, así como su descripción y las etapas que cubren. Así mismo, se indica aquellas fases de EICV que quedan cubiertas y con aquellos pasos definidos en los métodos pero que no siempre son utilizados. (GOBIERNO VASCO, 2009).

El método más utilizado para la evaluación de impactos en un ciclo integral del agua según el estado del arte es el CML 2001. Este método es basado en el anterior CML 1992. El paso de normalización es opcional para ACVs simplificados, pero obligatorio para ACVs exhaustivos. Dispone de valores de referencia para la normalización de los indicadores de las categorías de impacto: A nivel mundial en 1990, a nivel europeo en 1995 y a nivel holandés en 1997. La metodología CML 2001 es una metodología de puntos intermedios, es decir, con un planteamiento orientado al problema ambiental. Para la caracterización utiliza 10 categorías de impacto (disminución de la capa de ozono, toxicidad humana, ecotoxicidad de agua dulce, ecotoxicidad agua de mar, ecotoxicidad terrestre, oxidación fotoquímica, calentamiento global, acidificación, agotamiento de recursos abióticos y eutrofización). (ECORAE, 2013).

4.2.4.2. Categorías de Impacto. Una vez seleccionado el método de evaluación se deben determinar las categorías de impacto, indicadores de categoría descritos en el Anexo C y los modelos de caracterización que incluye el estudio (ver descripción Anexo D). En esta metodología se propone una lista de categorías de impacto clasificadas en tres grupos según su obligatoriedad o no de incluirlas en los ACV:

- A. Categorías de impacto obligatorias, utilizadas en la mayoría de ACVs
- B. Categorías de impacto adicionales, para las cuales existen indicadores pero no siempre son incluidos.
- C. Otras categorías de impacto, para las cuales no se dispone de indicadores que permitan cuantificar el impacto y por tanto no son incluidas en los ACV.

Tabla 1. Clasificación de las categorías de impacto según la metodología CML.

Categoría de Impacto	Área Protección ⁴	Unidades	Escala Geográfica ⁵	CML
Entradas				
Agotamiento recursos abióticos	IV	Kg Sb/año	Global	A
Energía	IV	MJ/kg	Global	A
Uso del suelo	IV	-	Local	A
Pérdida soporte vida	I,II,III	-	Local	B
Pérdida biodiversidad	II	-	Local	B
Salidas				
Cambio climático	I,II,III	Kg CO2	Global	A
Agotamiento ozono	I,II,III,IV	Kg CFC-11	Global	A
Acidificación	I,II,III,IV	Kg SO2/kg H+	Conti./Reg./Glo./Loc.	A
Eutrofización	I,III,IV	Kg PO3-	Conti./Reg./Loc	A
Formación foto oxidantes	I,II,III,IV	Kg etileno	Conti./Reg./Loc	A
Toxicidad				
Humana	I	Kg 124 DCB/kg Pb aire	Conti./Reg./Glo./Loc	A
Terrestre	II,IV	Kg 124 DCB/Kg Zn aire	Conti./Reg./Glo./Loc	A
Acuática marina	II,IV	Kg 124 DCB	Conti./Reg./Loc	A
Acuática, agua dulce	II,IV	Kg 124 DCB/Kg Zn agua	Conti./Reg./Glo./Loc	A
Sedimento agua dulce	II,IV	Kg 124 DCB	Conti./Reg./Loc	B
Sedimento marino	II,IV	Kg 124 DCB	Conti./Reg./Loc	B
Otros				
Desecación	-	-	Local	C
Radicaciones	-	-	Reg./Loc.	B
Olor	-	-	Local	B
Ruido	-	-	Local	C

Fuente: BIZKAI LAB. Metodología para el Análisis de Ciclo de Vida de Depuradoras de aguas residuales. [Report]. - Bilbo, España : Universidad de Deusto, 2012.

⁴ Áreas de protección: (I) salud humana, (II) entorno natural, (III) entorno modificado por el ser humano, (IV) recursos naturales.

⁵ Escala geográfica: continental / regional /local /global

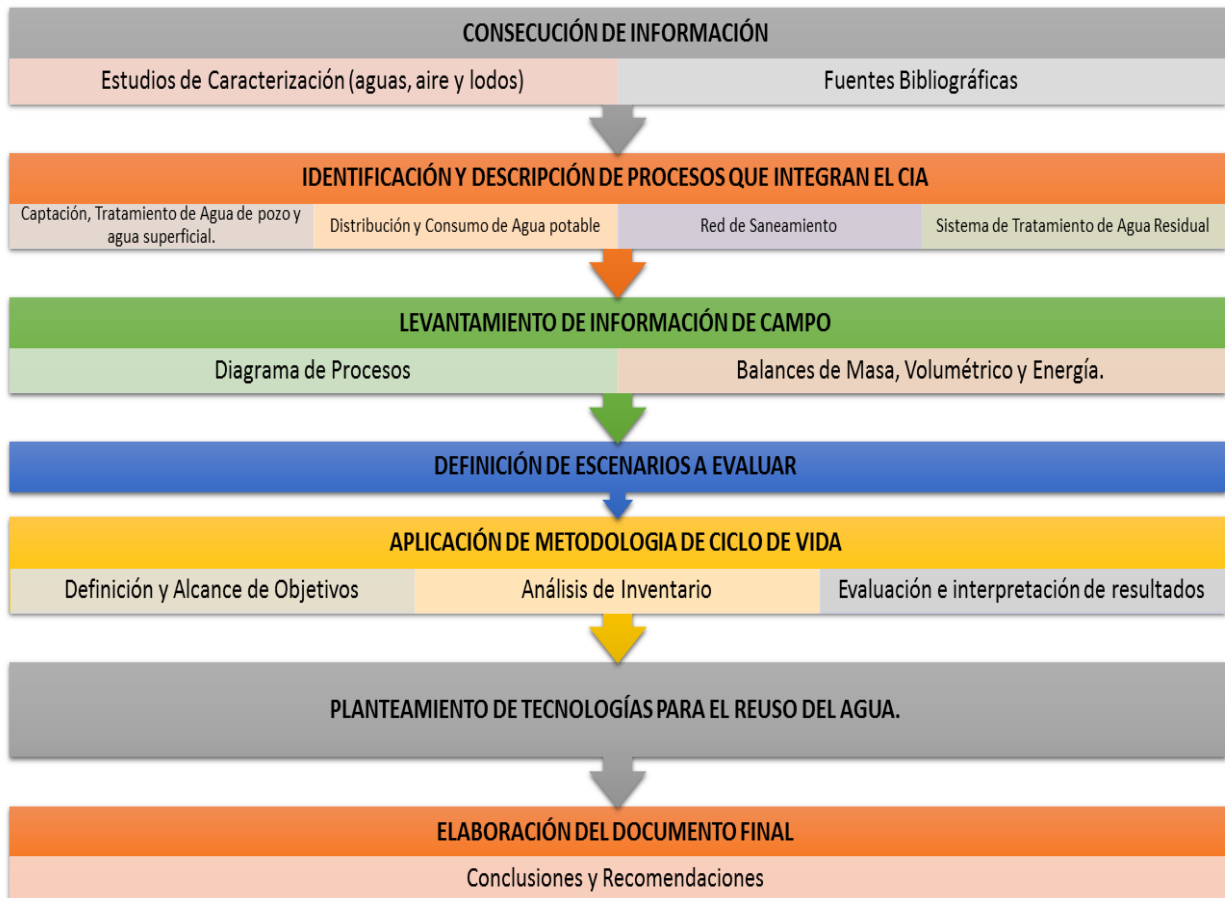
El programa más utilizado en la industria a nivel internacional es el Software Simapro. Este es una herramienta profesional que permite analizar y realizar el seguimiento del rendimiento ambiental a un producto o un servicio, pues facilita el análisis y la representación gráfica de ciclos complejos con base en las recomendaciones de la ISO 14040.

En la EICV se seleccionan categorías de impacto e indicadores de categoría para reflejar los asuntos ambientales relacionados con el sistema bajo estudio; los modelos de caracterización vinculan los resultados de los inventarios con los indicadores de categoría a través de factores de caracterización (GONZÁLEZ, 2007).

5. DESARROLLO METODOLOGICO

La metodología propuesta para el desarrollo del trabajo se visualiza en la siguiente figura, la cual comprende 7 fases que se describen a continuación:

Figura 8. Metodología a implementar.



Fuente: Autor

5.1 CONSECUCCIÓN DE INFORMACIÓN

En esta etapa se recolectó la información completa, concerniente a la caracterización del agua proveniente del sistema de captación (aguas arriba del punto de captación) y de vertimiento (aguas abajo del punto de vertimiento la PTAR), datos suministrados directamente por la

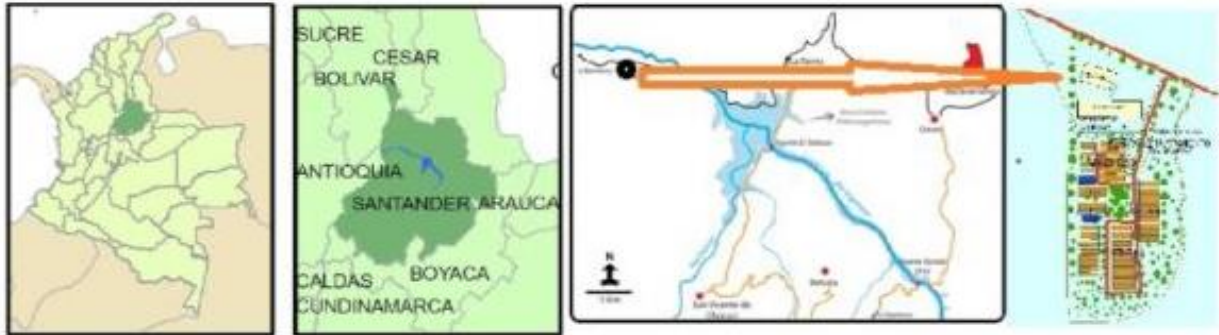
Central Hidroeléctrica y que fueron medidos y analizados por el laboratorio STI (empresa contratista). Así mismo, se obtuvo la caracterización de las aguas monitoreadas a la entrada y salida de la PTAP para dos escenarios de estudio (escenario 1: consumo de permanganato de potasio como antioxidante, reemplazado actualmente por el ozono, como escenario 2) y de la PTAR, información analizada y entregada directamente por el laboratorio interno de la Central Hidroeléctrica. La información recopilada está definida para el año 2015 en un periodo de tiempo mensual y trimestral, dependiendo del punto de muestreo realizado por la Central. De igual forma, la empresa entregó en formato Excel, la información puntual sobre los consumos de materia prima y gastos energéticos requeridos en los diferentes procesos. Adicionalmente, se solicitó a la central Hidroeléctrica la caracterización de los lodos obtenidos en el sistema de reacción de la PTAR.

Es de enunciar que el estudio utilizó las cargas ambientales del proceso de combustión del diésel y del uso de energía eléctrica colombiana obtenidas en clases magistrales, puesto que la energía producida por el hidroeléctrica no se utiliza en las etapas del ciclo integral del agua doméstica del campamento. Toda la información descrita fue requerida para la construcción del Inventario de Ciclo de Vida que se debe indexar al Software de estudio (Simapro 7.1) y que se detalla con mayor claridad en la aplicación de la metodología ACV.

5.2. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE PROCESOS

El proyecto de aplicación se desarrolla en el campamento El Cedral de la Central Hidroeléctrica Sogamoso ubicado en la vereda La Putana del municipio de Betulia departamento de Santander con coordenadas 1.068.688 E, 1.279.276 N, como se muestra en la figura 9. El área se encuentra a una altura de 170 m.s.n.m. y cuenta con una temperatura promedio entre 27 y 28° C y una precipitación promedio anual de 3.362 mm anuales y corresponde a una zona de vida de Bosque húmedo Tropical bh – T.

Figura 9. Ubicación Geográfica del Proyecto.



Fuente: Autor

Según el enfoque prospectivo sobre el ciclo integral del agua, fue seleccionada la metodología de ACV como herramienta clave para evaluar los impactos ambientales potenciales generados en las diferentes etapas de captación de agua, de tratamiento del agua potable, distribución y uso del agua en campamento y el tratamiento de agua residual, como etapas integradas al ciclo integral del agua de uso doméstico. Cabe resaltar que este estudio no se ha implementado en ninguna hidroeléctrica a nivel regional ni nacional y que sólo se evaluaron los impactos ambientales asociados a las actividades del consumo y vertimiento de agua en el campamento y no a los procesos de obtención de la electricidad ni de la central hidroeléctrica. A continuación se hará una breve descripción del caso de estudio (Ciclo integral del agua en un campamento de una hidroeléctrica) a evaluar, incluyendo los procesos y subprocesos que son función del ciclo integral del agua en una hidroeléctrica:

Figura 10. Diagrama del Ciclo Integral del Agua del Campamento el Cedral.



Fuente: Autor

5.2.1. Captación. El sistema de captación cuenta con dos puntos de recepción: un pozo subterráneo del cual se extrae un caudal de 0,4 l/s y que es usado ocasionalmente cuando se presentan interrupciones en la conducción del agua de río, y la captación directa del río Sogamoso, que consiste en el bombeo del agua por medio de una motobomba a un campo de infiltración. El agua es conducida hasta una segunda piscina y de ahí a una tercera piscina donde el agua es bombeada a través de una bomba electro-sumergible y conducida por medio de una tubería de 4" hacia la planta de tratamiento de agua potable.

5.2.2. Tratamiento de agua de pozo. El agua es captada por medio de bombeo y se inyecta un oxidante de metales (Permanganato de Potasio). El agua con oxidante llega a un tanque de almacenamiento para cumplir el tiempo de reacción química de la oxidación. Mediante la tubería se dosifica por bombas de diafragma productos químicos de corrección de pH (soda cáustica) y coagulante (sulfato de aluminio tipo B) para desestabilizar eléctricamente los sólidos no sedimentables.

El agua acondicionada ingresa a la planta modular de forma ascendente (aunque el agua llega por la parte superior), interiormente cuenta con tubería que descarga el agua en el fondo del tanque y hace que se llene de abajo hacia arriba. En esta etapa se inician los procesos de coagulación y floculación en lecho poroso grueso (tamaño descendente) para la retención del floc y pasa a la filtración en arena y una filtración descendente especializada en carbón activado granular.

5.2.3. Sistema de Tratamiento de agua potable. En el campamento de la hidroeléctrica se encuentra instalada una Planta de tratamiento de agua potable compacta de pozo profundo con una capacidad máxima de diseño de 1,0 l/s. Para suplir la dificultad de baja capacidad del pozo subterráneo se cuenta con un suministro de agua del río Sogamoso (captado a través de una dársena que funciona como sedimentador y almacenador) (INGENIERÍA DE AGUAS - INGEAGUAS, 2012).

Características:

- Captación de agua cruda: río Sogamoso ($Q=1,0$ l/s).
- Tiempo de operación: 16 horas/día
- Consumo promedio del campamento El Cedral 64 m³/día
- Planta de Tratamiento Fabricada por INGEAGUAS

El agua es bombeada desde el Río Sogamoso hacia el campamento por medio de tuberías de 4". En la línea se dosifica un oxidante de metales (permanganato de potasio). El agua llega a dos tanques en fibra de vidrio (capacidad de 15 m³) que están en serie para garantizar el tiempo de residencia. El agua oxidada es bombeada y tratada químicamente con un coagulante (policloruro de aluminio PAC) desestabilizador de sólidos no sedimentables y un floculante que favorece la aglomeración y sedimentación de los flocs formados. Seguidamente el agua tratada pasa a la unidad de floculación, sedimentación de manto de lodos (FSML) para retener y clarificar el agua proveniente del influente. Finalmente pasa a la filtración en arena y una filtración descendente especializada en carbón activado granular.

Fases del sistema:

- **Dosificación:** Consiste en aplicar permanganato de potasio al agua procedente de captación, a través de una bomba dosificadora con una capacidad de 2,4 galones por hora (gph) a una presión máxima de 100 psi; y es almacenada en dos tanques de 15 m³ donde se da el proceso de oxidación, que consiste en eliminar los coloides, materia orgánica, lodos, arcillas.
- **Coagulación/Floculación:** una vez se realiza el proceso de oxidación el agua, ésta es conducida a través de una electrobomba de 1 HP al floculador sedimentador; donde se inyecta a través de una bomba dosificadora (capacidad de 9,6 gph) un coagulante (Policloruro de Aluminio) y un floculante (Acuaflex FB), este último permite acelerar el proceso. En este proceso se lleva a cabo la eliminación de impurezas que se encuentran en el agua superficial como materia orgánica en suspensión y materia coloidal; causando un incremento de tamaño del flóculo y su rápida aglomeración, disminuyendo así el tiempo de sedimentación de las partículas. El floculador-sedimentador cuenta con

paneles de sedimentación de alta tasa que garantiza una eficiencia de clarificación del 90 a 95%.

- **Decantación/Filtración:** el agua es conducida del floculador-sedimentador a la unidad de filtración donde el agua es filtrada a través de un lecho poroso grueso para su posterior filtración en arena de flujo ascendente donde son retenidas las partículas sólidas. En el proceso de filtración los lechos de arena retienen las partículas que se escaparon en el proceso de floculación-sedimentación, obteniéndose agua tratada con valores de turbidez (2 NTU) dentro de la norma para el consumo humano. Finalmente se conduce el agua a una filtración especializada con carbón activado de flujo descendente. El carbón activado es granular, de alta absorción molecular para remover las impurezas causantes de olor, color y sabor en el agua.
- **Desinfección:** se realiza por medio de tratamiento químico, mediante la inyección de cloro a través de una bomba dosificadora con una capacidad de 2,4 galones por hora (gph) a una presión de 100 psi, proceso que se lleva a cabo al ingresar a un tanque de trasiego de 2000 litros, para ser bombeada a los tanques de almacenamiento y distribución de agua tratada.

5.2.4. Distribución. El agua tratada es enviada a través de un sistema de bombeo (Hidroflow) que ayuda a tener un sistema de presión en la línea de distribución. El mecanismo es direccionado por el funcionamiento de dos bombas de 6 Hp conectadas en serie, que trabajan alternadamente garantizando una presión en el sistema de 18 a 50 psi. El agua es conducida a través de una red primaria en tubería PVC de 4" y una red secundaria de 2 2" pulgadas y redes internas de 1/2".

5.2.5. Consumo. El agua es utilizada en promedio para 184 personas de las diferentes áreas de operación del campamento como son: oficinas, casino, viviendas y otras.

5.2.6. Red de saneamiento. El agua residual obtenida de las diferentes áreas de consumo es vertida en redes (tubería de PVC 4") y es conducida hacia la planta de tratamiento de agua residual doméstica.

5.2.7. Sistema de Tratamiento de agua residual. La planta de aguas residuales domésticas funciona a través del tratamiento de tipo biológico (aeróbico) por lodos activados de lecho fijo y sistemas de película fija integrado por una sola fase, la cual tiene lugar en el mismo reactor mediante un sistema ECOPAC. La planta fue fabricada por la empresa TECO con caudal de diseño de 0,8 L/s (TECNOLOGÍAS ECOLOGICAS - TECO, 2015).

- **Succión:** El agua servida procedente de las viviendas, casinos, oficinas y demás, llega al pozo por medio de gravedad donde es succionada a través de una bomba tipo Pedrollo Top Vortex de 0,5 HP conectada a 110 voltios.
- **Homogenización:** El agua succionada es bombeada a un reactor construido en fibra de vidrio con un volumen de 15 m³ donde se realiza la homogenización de las características físico químicas del afluente, garantizando un caudal constante de tratamiento que es requerido para obtener una alta eficiencia en la planta. En el reactor se encuentra instalada una canastilla que tiene como función retener los sólidos bombeados hacia el homogenizador, la cual protege la bomba del homogenizador del material sólido.

En este proceso comienza la transformación de la materia orgánica, se separan los sólidos gruesos y comienza la oxidación de la materia. El agua es llevada hacia el sistema de reacción a través de una bomba Pedrollo Top Vortex.

- **Sistema de Reacción:** Esta se da a través de dos (2) reactores marca ECOPAC que tienen una capacidad de 18 m³ y procesa 33,5 m³/día cada uno. La degradación biológica de la DBO₅ se efectúa mediante la inyección de aire tomado de la atmósfera, empleándose dos bombas sumergibles Pedrollo ZXm1A de 0,85 Hp conectada a una fuente de 220 voltios. Este suministra el oxígeno necesario para oxidación de la materia

orgánica, así como también el necesario para el metabolismo de los microorganismos, por lo cual no existen procesos fermentativos.

Cada reactor tiene tres estrellas difusoras de aire ubicadas en la parte inferior del reactor las cuales suministran el oxígeno necesario para la acción depuradora de las bacterias aerobias, el cual penetra significativamente en los poros del lecho de una película fija, que garantiza la eliminación de olores desagradables. Todo este proceso es un tratamiento aerobio de lecho fijo en el que se aumenta considerablemente la velocidad de crecimiento de los microorganismos (TECNOLOGÍAS ECOLOGICAS - TECO, 2015).

- **Clarificación:** se realiza a través de un clarificador de flujo ascendente con capacidad de 6 m³, en él se realiza un proceso físico para darle un pulimiento a las aguas residuales domésticas y precipitar los sólidos que alcanzan a pasar desde los reactores. En este proceso se entrega agua limpia, libre de sólidos ya que las partículas que alcanzan a pasar se depositan en su parte inferior que es cónica.
- **Dosificación:** En este proceso se realiza la destrucción de los microorganismos patógenos que no han sido eliminados en las fases iniciales del tratamiento de agua. Involucra un tratamiento especializado mediante el empleo de agente físico o químico para la destrucción de microorganismos que pueden ser peligrosos. Se realiza en un tanque dosificador de 150 litros donde está sumergida la granada de la bomba dosificadora. En él se prepara una mezcla de 2250 ml de hipoclorito de sodio con 147,75 litros de agua potable, el cual es inyectada mediante la bomba dosificadora en una dosificación de 104 ml/min durante 24 horas, procedimiento que se debe realizar todos los días.

El Contacto del cloro con el agua residual se lleva a cabo en un tanque con capacidad de 2,6 m³, con este sistema se logra una buena oxidación de la materia Orgánica y pulimiento final de las aguas residuales (TECNOLOGÍAS ECOLOGICAS - TECO, 2015).

- **Secado:** El lodo extraído de todo el sistema se lleva a un lecho de secado.

- **Descarga:** Finalmente el agua tratada es trasladada a un pozo en concreto, para ser bombeada hacia el río Sogamoso.

Para que el cultivo de microorganismos se desarrolle se necesita:

- Una fuente de alimentación, en este caso el agua residual entrante.
- Un sistema de aireación que aporte el oxígeno necesario para el metabolismo aerobio microbiano.
- Un sistema de agitación que homogenice el reactor de aireación de forma que se aumente la probabilidad de contacto entre las colonias bacterianas y la materia orgánica a oxidar.

Con estas tres premisas lo que se obtendrá en el reactor de aireación serán grandes colonias agrupadas de microorganismos en el lecho de soporte. Lo anterior es posible gracias a que el reactor cuenta con un soporte sintético donde todos los microorganismos responsables de la eliminación de la materia orgánica son fijados y crecen en colonias en las cuales reciben el alimento y el oxígeno necesario para su metabolismo.

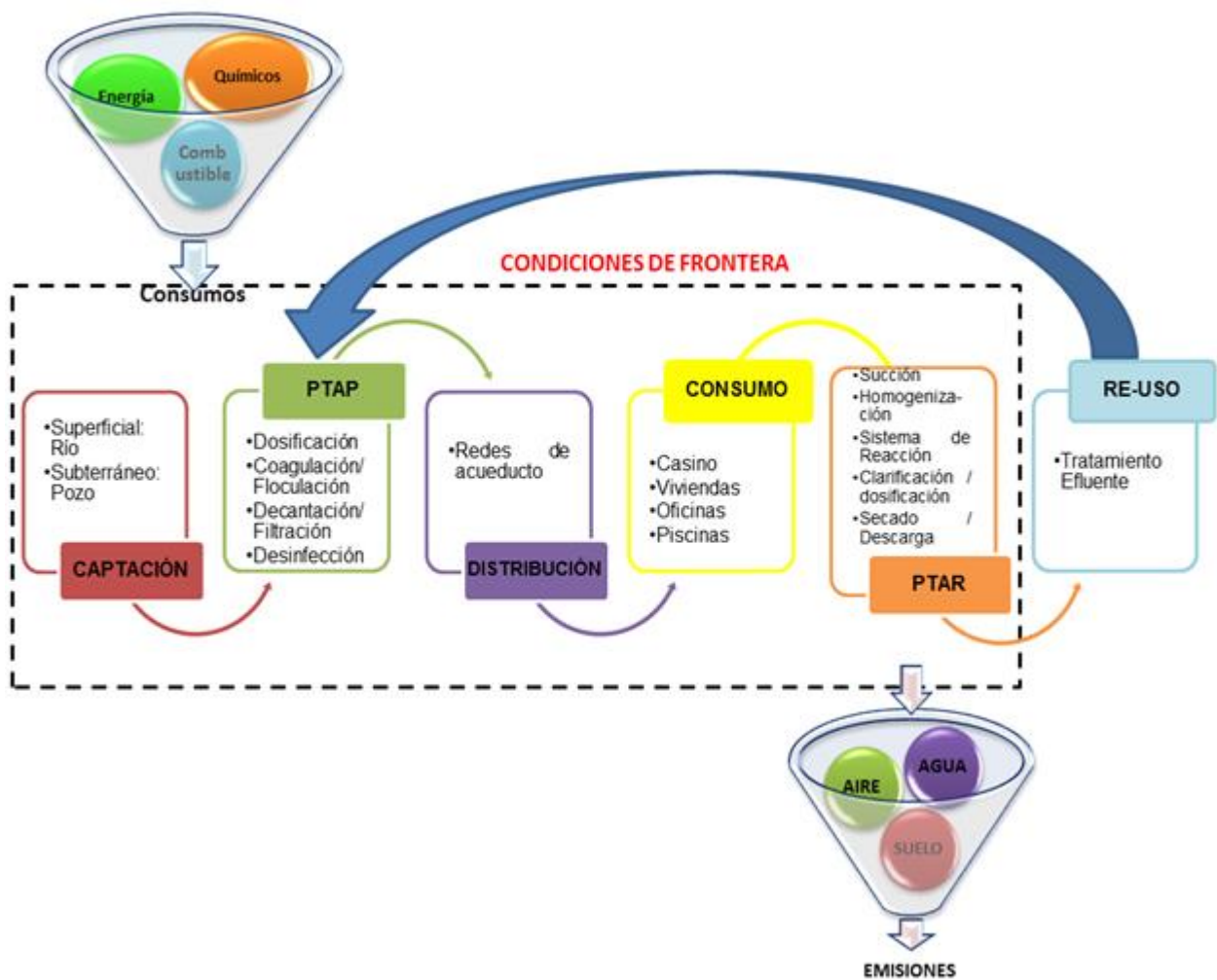
Este sistema tiene entre otras ventajas:

- La generación de lodos es mínima, gracias a que los microorganismos cumplen un ciclo de vida completo, permitiendo que se requieran menos microorganismos para lograr la misma eficiencia.
- El sistema presenta gran estabilidad frente a caudales de punta, esto debido a que no existen fenómenos de arrastre del lodo activado ya que estos están fijados en un material.
- Existen gran cantidad de especies microbianas, ya que en el sistema se forman capas internas de bio-película que experimentan reacciones anaerobias, lo que en términos finales se traduce en mayor estabilidad y eficiencia.
- Los sistemas son de menor tamaño y por consiguiente ocupan menor espacio.

5.3. ANÁLISIS DE PROCESO

Con base en la identificación y descripción de los procesos descritos en el anterior ítem, se representan en el siguiente diagrama de proceso las etapas y sub-etapas objeto de estudio. En la siguiente figura se ilustra el consumo de materias primas, las etapas del proceso a intervenir y las emisiones generadas. La línea discontinua representa el límite y alcance funcional del estudio, puesto que no se consideran los impactos asociados a la producción de insumos y otros como se describirá más adelante.

Figura 11. Diagrama de Proceso del Ciclo Integral del Agua



Fuente: Autor

La caracterización de las aguas de captación, vertimiento al Río Sogamoso, como el agua utilizada en cada planta de tratamiento PTAP y PTAR en función de su composición física y química, considerando los límites establecidos en la normatividad pertinente (Decreto 1594 de 1984, Resolución 2115 de 2007), son un ejemplo de los tipos de datos recopilados en el ICV, el cual se presenta de manera detallada en las siguientes tablas. La caracterización reportada corresponde a los valores promedio de cada trimestre obtenido del año 2015 (Enero, Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre) y 2016 (Marzo). Los valores puntuales de cada mes se presentan adjuntos en el **Anexo E**. En las tablas 2 y 3 se aprecia la caracterización del agua antes y después de la PTAP para el escenario 1 que consume permanganato de potasio, en donde al comparar el valor del resultado con el referente de la norma resolución 2115 del año 2007, se halló que los parámetros coliformes totales y color aparente están por encima de la norma.

Tabla 2. Caracterización del agua antes y después de la PTAP (KMnO4)

Variable	Método	Unidad	V/r Referencia	V/r Entrada	V/r Salida
Alcalinidad Total	St. Mth 2320 B	mg CaCO ₃ /L	Máx. 200	65,67	50,50
Calcio	St. Mth 3500 CaD	mg Ca/L	Máx. 60	30,70	23,68
Cloro residual	St. Mth 4500 Cl G	mg/L	-	0,29	0,99
Cloruros	St. Mth 4500-Cl-B	mg Cl/L	Máx. 250	4,10	10,53
Coliformes totales	St. Mth 9222 B	UFC/100 mL	Máx 100 (salida)	185,50	0,00
Color Aparente	St. Mth 2120 C	Pt-Co	Máx. 15	68,23	8,67
Conductividad a 25°C	St. Mth 2510 B	us/cm	Hasta 1000	192,83	160,55
Dureza Cálcica	St. Mth 3500 CaD	mg CaCO ₃ /L	-	67,98	54,67
Dureza Magnésica	St. Mth 3500 MgE	mg CaCO ₃ /L	-	12,88	9,33
Dureza Total	St. Mth 2340 C	mg CaCO ₃ /L	Máx. 300	91,95	68,55
Hierro Total	St. Mth 3111 B	mg Fe/L	Máx. 0,3	0,24	0,08
Manganeso	St. Mth 3111 B	mg Mg/L	Máx 0,1	0,09	0,02
Nitratos	J.R.Caron Bacquet	mg NO ₃ -N/L	Máx.10	1,88	0,66
Nitritos	St. Mth 4500 NO2B	mg NO ₂ /L	Máx. 0,1	0,12	0,02
Ortofosfatos	St. Mth 4500 PE	mg PO ₄ -3/L		0,16	0,12
pH	St. Mth 4500 H+B	pH	6,5 - 9,0	7,55	12,6
Sólidos Suspendidos	Potenciometrico	mg/L	-	109,93	93,55
Sulfatos	St. Mth 4500 SO ₄ E	mg SO ₄ /L	Máx. 250	20,53	18,33
Turbidez	St. Mth 2130 B	NTU	Máx. 2	66,88	1,89

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa. 2016.

Tabla 3. Parámetros adicionales del agua antes y después de la PTAP (KMnO4).

Variable	Método	Unidad	Valor Referencia	Entrada PTAP	Salida PTAP
Aluminio	St. Mth 3111 D	mg Al/L	0,2	<0,02	0,2
Bario	St. Mth 3111 D	mg Ba/L	0,7	<0,15	0,7
Cadmio	St. Mth 3111 B	mg Cd/L	0,003	<0,003	0,003
Carbono Orgánico Total	St. Mth 3111 B	mg C/L	5	1,8	5
Cianuro	St. Mth 4500 CN-B	mg CN/L	0,05	0,24	0,05
Cobre	St. Mth 3111 B	mg Cu/L	1	<0,034	1
Cromo	St. Mth 3111 B	mg Cr/L	0,05	0,05	0,05
Floruros	St. Mth 4500 F-C	mg F*/L	1	0,02	1
Magnesio	St. Mth 3111 B	mg Mg/L	36	1,8	36
Mercurio	St. Mth 3112 B	mg Hg/L	0,001	<0,0009	0,001
Molibdeno	St. Mth 3111 B	mg Mo/L	0,07	<0,06	0,07
Níquel	St. Mth 3111 B	mg Ni/L	0,02	<0,02	0,02
Molibdeno	St. Mth 3111 B	mg Mo/L	-0,03	<0,02	-0,03
Níquel	St. Mth 3111 B	mg Ni/L	-0,08	<0,06	-0,08
Molibdeno	St. Mth 3111 B	mg Mo/L	-0,13	<0,10	-0,13

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa.2016.

En la tabla 4 se presenta la caracterización del agua antes y después de la PTAP para el escenario que consume ozono y peróxido de hidrogeno en vez del permanganato de potasio; datos que al comparar con los valores de referencia (resolución 2115 del 2007), se encontró que el parámetro de coliformes totales y color aparente están por encima de la norma, al igual que el caso del permanganato de potasio.

Tabla 4. Caracterización del agua antes y después de la PTAP (OZONO)

Variable	Método	Unidad	V/r Referencia	V/r Entrada	V/r Salida
Alcalinidad Total	St. Mth 2320 B	mg CaCO3/L	Máx. 200	84,50	66,50
Calcio	St. Mth 3500 CaD	mg Ca/L	Máx. 60	32,04	24,83
Cianuro libre	EPA 335.2	mg Cn/L	-	0,01	0,005
Cianuro disociable	EPA 335.2	mg Cn/L	-	0,01	0,005
Cloro residual	St. Mth 4500 Cl G	mg Cl2/L	-	0,04	0,36
Cloruros	St. Mth 4500-Cl-B	mg Cl/L	Máx. 250	10,00	9,00
Coliformes totales	St. Mth 9222 B	UFC/100 mL	Máx 100 (salida)	1500,00	0,00

Variable	Método	Unidad	V/r Referencia	V/r Entrada	V/r Salida
Color Aparente	St. Mth 2120 C	Pt-Co	Máx. 15	77,00	14,00
Conductividad a 25°C	St. Mth 2510 B	us/cm	Hasta 1000	198,60	170,30
Dureza Cálctica	St. Mth 3500 CaD	mg CaCO3/L	-	80,00	62,00
Dureza Magnésica	St. Mth 3500 MgE	mg CaCO3/L	-	29,50	22,50
Dureza Total	St. Mth 2340 C	mg CaCO3/L	Máx. 300	109,50	84,50
Hierro Total	St. Mth 3111 B	mg Fe/L	Máx. 0,3	0,52	0,03
Manganeso	St. Mth 3111 B	mg Mg/L	Máx 0,1	0,02	0,01
Nitratos	J.R.Caron Bacquet	mg NO3-N/L	Máx.10	5,00	4,00
Nitritos	St. Mth 4500 NO2B	mg NO2/L	Máx. 0,1	0,01	0,01
Ortofosfatos	St. Mth 4500 PE	mg PO4-3/L		0,06	0,05
pH	St. Mth 4500 H+B	pH	6,5 - 9,0	7,52	7,23
Sólidos Suspendidos	Potenciometrico	mg/L	-	123,00	112,00
Sulfatos	St. Mth 4500 SO4E	mg SO4/L	Máx. 250	10,00	9,00
Turbiedad	St. Mth 2130 B	NTU	Máx. 2	11,00	1,50

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa.2016.

En la tabla 5 se presenta la caracterización del agua captada directamente del Río Sogamoso (20 metros antes de la captación) y del vertimiento de la misma luego de ser consumida en el campamento y de pasar por la planta de depuración. En esta caracterización el único parámetro que estuvo fuera de los valores de referencia fue el hierro total. Así mismo, en la tabla 6 se presenta la caracterización del agua a la entrada y salida de la planta de tratamiento de agua residual.

Tabla 5. Caracterización del Río Sogamoso (20 metros antes de captación y 200 metros después vertimiento).

Variable	Método	Unidad	Valor Referencia	Antes	Después
Alcalinidad Total	St. Mth 2320 B	mg CaCO3/L	Máx. 200	58,7	61,9
Cloruros	St. Mth 4500-Cl-B	mg Cl/L	Máx. 250	4,7	5,3
Coliformes totales	St. Mth 9222 B	UFC/100 mL	Máx 20000(salida)	2123,7	1840,0
Color Aparente	St. Mth 2120 C	Pt-Co	Máx. 75	47,4	73,5
Conductividad a 25°C	St. Mth 2510 B	us/cm	Hasta 1000	213,2	216,0
DBO	St. Mth 5220 C	mg O2/L	-	3,8	4,1
DQO	St. Mth 5210 B	mg O2/L	-	10,3	10,7

Variable	Método	Unidad	Valor Referencia	Antes	Después
Dureza Total	St. Mth 2340 C	mg CaCO ₃ /L	Máx. 300	81,2	83,1
Fosfatos	St. Mth 3111 B	mg PO ₄ -3/L	-	0,2	0,2
Hierro Total	St. Mth 3111 B	mg Fe/L	Máx. 0,3	0,4	0,4
Nitratos	J.R.Caron Bacquet	mg NO ₃ -N/L	Máx.10	0,4	0,4
Nitrogeno Total	St. Mth 4500 N B	mg N/L	-	0,0	0,2
Ortofosfatos	St. Mth 4500 PE	mg PO ₄ -3/L	-	0,2	0,2
Oxígeno Disuelto	-	mg/L	-	4,5	5,6
pH	St. Mth 4500 H+B	pH	6,5 - 9,0	7,5	7,6
Sólidos Suspendidos	Potenciometrico	mg/L	-	61,8	44,1
Sólidos Totales	-	mg/L	-	95,6	126,3
Sulfatos	St. Mth 4500 SO ₄ E	mg SO ₄ /L	Máx. 250	17,1	17,3
Turbidez	St. Mth 2130 B	NTU	Máx. 190	37,0	35,1

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa. 2016.

Tabla 6. Caracterización del agua antes y después de la PTAR.

Variable	Método	Unidad	Entrada PTAR	Salida PTAR
Caudal		(L/s)	0,92	0,76
pH	St. Mth 4500 H+B	pH	7,33	7,26
Grasas y aceites	St. Mth 5520 B	mg/L	65,09	9,23
Coliformes totales	St. Mth 9222 B	UFC/100 ml	1,88E+07	1,58E+07
E-coli	St. Mth 9222 B	UFC/100 ml	1,18E+07	7,89E+06
Sólidos Suspendidos T	St. Mth 2540 B	mg/L	118,93	19,60
Demanda Química Oxígeno	St. Mth 5220 C	mg O ₂ /L	402,00	86,47
Demanda Bioquímica Oxígeno	St. Mth 5210 B	mg O ₂ /L	232,59	41,47
Tensoactivos	St. Mth 5540 C	mg/L	7,10	3,02
Fósforo Total	St. Mth 4500 PE	mg P/L	1,95	1,80
Nitrógeno	St. Mth 4500 NC	mg N/L	12,09	9,20

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa. 2016.

5.4. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS A EVALUAR

A partir de la información suministrada por la central hidroeléctrica y acorde a los procesos que integran el ciclo del agua, el estudio evaluó, cuantificó y comparó los impactos ambientales asociados a todas las etapas que conforman el ciclo integral del agua. Los escenarios definidos fueron:

- **Primer Escenario:** Análisis de ciclo de vida por atributos a la Planta de Tratamiento de Agua potable, desde el sistema de captación del río Sogamoso hasta la obtención de agua como suministro al campamento el Cedral ubicado dentro de la hidroeléctrica.
 - Análisis de ciclo comparativo del primer escenario modificando el reactivo químico antioxidante, utilizado en la etapa de Floculación (permanganato de potasio vs ozono).

- **Segundo Escenario:** Análisis de ciclo de vida por atributos a la Planta de Tratamiento de Agua residual desde el sistema de canalización del campamento (vertimiento de aguas residuales) hasta la obtención del agua que se vierte de nuevo al río Sogamoso.

- **Tercer Escenario:** Análisis de ciclo de vida por atributos para la Integración del primer escenario (reactivo con menor impacto ambiental potencial), se incluye la distribución y uso del agua en el campamento, el segundo escenario, hasta el vertimiento del agua al río Sogamoso.

Previo al análisis de ciclo de vida se revisó el Estudio de Impacto Ambiental Central Hidroeléctrica⁶ donde se contempla la construcción del campamento e indica el tratamiento y disposición que se deben dar a las aguas de uso doméstico. (ISAGEN, 2008)

5.5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACV AL CICLO INTEGRAL DEL AGUA

La metodología de Análisis de Ciclo de vida se encuentra regulada por la norma internacional ISO 14040⁷ e ISO 14044⁸ que conlleva el desarrollo de las siguientes 4 fases fundamentales:

⁶ Estudio de Impacto ambiental: evaluación de la capacidad del territorio para admitir determinada actividad y la contaminación en el entorno.

⁷ ISO 14040/2006: Gestión Ambiental, Análisis de Ciclo de Vida; Principios y marco de Referencia.

⁸ ISO 14044/2006: Gestión Ambiental, Análisis de Ciclo de Vida; Requisitos y Directrices.

5.5.1. Definición del objetivo y alcance. Acorde a la norma ISO 14040 se inició este estudio con la definición del objetivo y alcance, el cual define el sistema a intervenir, a través de una pequeña descripción de la unidad funcional así como de los límites del sistema bajo estudio INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION., (2006). Luego se procede a la identificación de cada unidad de proceso del ciclo de vida: captación, tratamiento de agua potable y agua residual, utilizadas en el campamento el Cedral de la central Hidroeléctrica Sogamoso que conforma el ciclo integral del agua.

5.5.1.1. Definición del Objetivo. Realizar la determinación, cuantificación y evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados al ciclo de abastecimiento (cuenca hídrica y agua subterránea o pozo), al tratamiento de 1 m³ de agua potable y al tratamiento de 1 m³ de agua residual doméstica, utilizadas en el campamento el Cedral de la central Hidroeléctrica Sogamoso. Lo anterior se realizó mediante la aplicación de la metodología ACV comparativa y por atributos, soportados con el software Simapro 7.1®; con el fin de proponer alternativas de mejora para mitigar impactos y mejorar la sostenibilidad del agua vertida a la fuente hídrica que conforman el ciclo integral del agua.

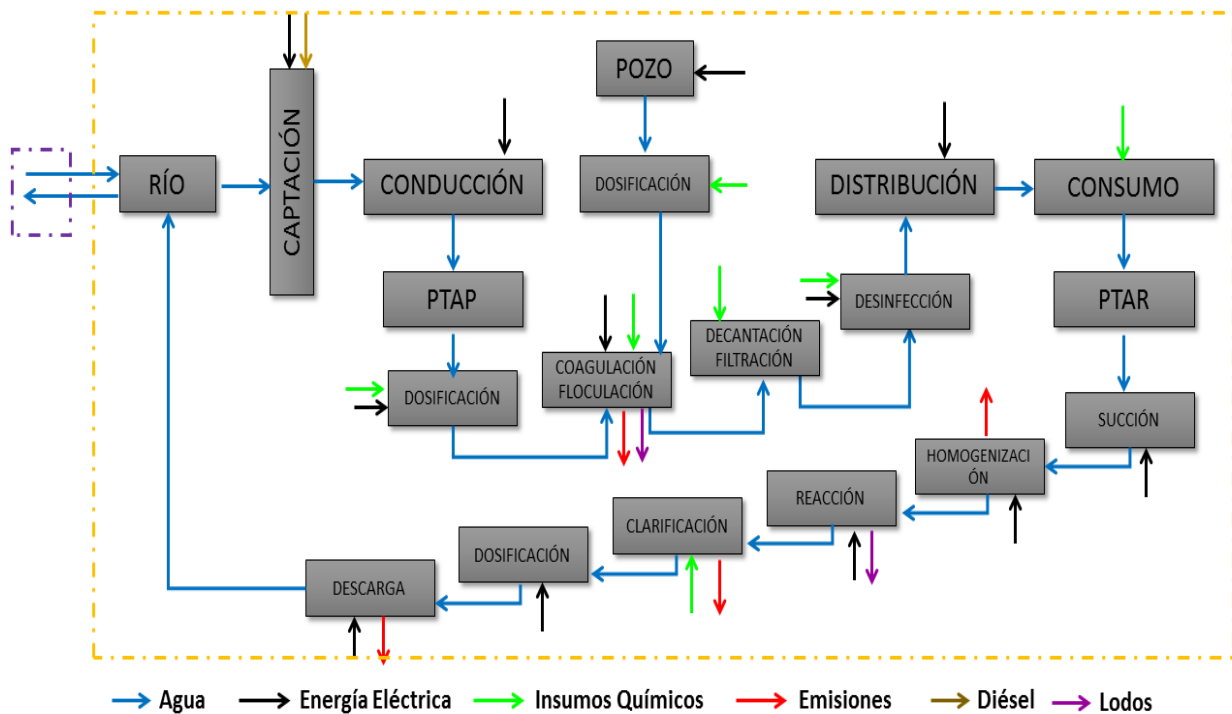
5.5.1.2. Definición del Alcance de estudio. El ACV para el tratamiento de agua potable y residual, evalúa la eficiencia energética e impactos ambientales potenciales generados en cada proceso mediante la tipología comparativa “cuna a la tumba”, con el fin de establecer una aproximación ambiental desde el punto de vista del consumo eléctrico y consumo de insumos químicos, para las etapas de abastecimiento (cuenca hídrica y agua de pozo) hasta que se trata el agua contaminada en la planta de tratamiento de agua residual que posteriormente es vertida al efluente hídrico.

5.5.1.3. Unidad Funcional. La unidad a la cual se referencian todas las cargas ambientales del inventario de ciclo de vida para este estudio fue de 1 m³ de agua potable y 1 m³ de agua residual.

5.5.1.4. Límites Geográficos. Se determinó como límite del sistema aquella unidad de proceso que no es comparable entre las plantas de tratamiento PTAP y PTAR, como lo fueron: los impactos asociados en la cuenca hídrica aguas arriba del sector de captación (abastecimiento) y aguas abajo del vertimiento que sale de la planta de tratamiento de aguas residuales. Por consiguiente el ACV determinado para el estudio se categoriza de la cuna a la puerta, cuyo interés y necesidad de la hidroeléctrica es el análisis ambiental desde la cuenca hídrica hasta que trata el agua captada, consumida y tratada finalmente en una PTAR para luego ser vertida al efluente, información aportada por la misma empresa.

En la siguiente figura se muestran los procesos unitarios objeto de estudio delimitados con la línea de color naranja (captación, conducción, potabilización, distribución, consumo, red de alcantarillado, depuración y vertimiento) y sus relaciones, así como la unidad de proceso excluida del estudio: caracterización aguas arriba y aguas debajo de los procesos objeto de estudio.

Figura 12. Límites y Procesos Unitarios del Ciclo Integral del Agua.



Fuente: Autor

5.5.1.5. Límites Temporales. Para el estudio se consideró como límite temporal el análisis de datos históricos entregados por la hidroeléctrica con fecha del 01 de Enero del 2015 hasta el 31 de Diciembre del año 2015. Debido a que en la planta se produjo un cambio de reactivos químicos que permitió disminuir los impactos ambientales en el proceso de potabilización y tratamiento de aguas residuales domésticas, se incluyó información del mes de Julio del 2016 fecha de modificación en los procesos.

5.5.1.6. Reglas de Exclusión. En la implementación de la metodología ACV se excluye la etapa concerniente al vertimiento de residuos al río aguas arriba del punto de captación debido a que no se tiene información por parte de la empresa y aguas abajo como punto de disposición final del agua ya que existen otros puntos de contaminación; al igual que la generación y disposición final de residuos sólidos pues son tratados por una empresa contratista (gestión realizada por DESCONT) y lodos (utilizados en compost); los impactos asociados a la obtención de materias primas (reactivos, insumos, combustibles, etc.), como de los instrumentos utilizados en el área de mantenimiento. No se consideraron las cargas ambientales asociadas a:

- El transporte de materias primas (tuberías, insumos, repuestos, equipos, herramientas, etc.).
- Los bienes de capital y obras (equipos de procesamiento, maquinarias, sistemas de tuberías, vehículos, edificios, obras civiles, pozos, etc.).
- El consumo de químicos utilizados en los laboratorios para los análisis de calidad del agua cruda como del agua tratada.
- El uso y desgaste de los accesorios y tuberías utilizados en las redes de distribución.

5.5.2. Análisis del Inventario de Ciclo de vida – ICV. Esta fase está direccionada por la norma ISO 14044, que conlleva a la evaluación de los impactos ambientales potenciales en relación a los resultados obtenidos del análisis del inventario (INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION., 2007). Para su realización se tomó como base la información técnica obtenida por el simulador Simapro 7.1 (Escenario de Energía Eléctrica y diésel del contexto Colombiano) y se complementó con datos reportados por consultores, oficinas de gestión de

aguas, datos bibliográficos y juicio de expertos de la Central Hidroeléctrica. Este paso constituye uno de los elementos más relevantes del ACV, ya que con base en éste, se evalúan los impactos ambientales.

5.5.2.1. Balances de masa y energía. El inventario de impactos ambientales está basado principalmente en los balances de materia (flujos volumétricos y másicos) y energía utilizada en el sistema, mediante la recopilación de datos de campo y la realización de cálculos que permitieron cuantificar las entradas y salidas del sistema objeto de estudio. Los datos promedio respecto al consumo de agua, químicos, energía eléctrica, fueron analizados para el año 2015 y 2016 en cada unidad de proceso integrada al sistema de potabilización de 1 m³ de agua, como se indica en la tabla 7 y 8, como suministro de información preliminar aportada por la empresa.

Tabla 7. Balance Másico para el escenario con Permanganato de Potasio en la PTAP.

Sustancia	Unidad	Captación	Almacenamiento	Floculación	Filtración	Desinfección	Tanques
Agua de Río	m3	0,67657456	0,663043067	-	-	-	-
Agua de Pozo	m3	0,43877521	0,429999701	-	-	-	-
Soda Caustica	g	6,00	-	-	-	-	-
Sulfato de aluminio	g	25,00	-	-	-	-	-
Permanganato de Potasio	g	-	3,090308597	-	-	-	-
Acuaflex	g	-	-	0,10003981	-	-	-
Policloruro de Aluminio	mL	-	-	22,4178309	-	-	-
Carbón activado	g	-	-	-	5,00539374	-	-
Hipoclorito de Calcio	g	-	-	-	-	2,80106775	-
Agua Cruda	m3	-	-	1,03839063	-	-	-
Agua Tratada	m3	-	-	-	1,03839063	1	1
Diesel	kg	0,00640608	-	-	-	-	-

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa. 2016.

Tabla 8. Balance Másico para el escenario con Ozono en la PTAP.

Sustancia	Unidad	Captación	Almacenamiento	Floculación	Filtración	Desinfección	Tanques
Agua de Río	m3	0,67657456	0,663043067	-	-	-	-
Agua de Pozo	m3	0,43877521	0,429999701	-	-	-	-
Soda Caustica	g	6,00	-	-	-	-	-
Sulfato de aluminio	g	25,00	-	-	-	-	-

Peroxido de Hidrogeno	g	-	5,33	-	-	-	-
Oxigeno	g	-	1,163887339	-	-	-	-
Acuaflex	g	-	-	0,10003981	-	-	-
Policloruro de Aluminio	mL	-	-	22,4178309	-	-	-
Carbón activado	g	-	-	-	5,00539374	-	-
Hipoclorito de Calcio	g	-	-	-	-	2,801067753	-
Agua Cruda	m3	-	-	1,03839063	-	-	-
Agua Tratada	m3	-	-	-	1,03839063	1	1
Diesel	galón	0,00640608	-	-	-	-	-
Lodo	kg	-	-	-	0,04182226	-	-

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa. 2016.

En la siguiente tabla se presentan los flujos másicos utilizados en la distribución de 1 m³ de agua potabilizada, distribuida en el campamento el Cedral. En la tabla se tiene en cuenta los consumos de químicos, desinfectantes y demás insumos de aseo utilizados dentro del campamento El Cedral, todos los consumos están asociados a 1 m³ de agua.

Tabla 9. Balance Másico en el Campamento el Cedral.

Material	COMPUESTO	AREA	CONSUMO (L/mes)	L/m3
Detergente ropa	Etoxilato de alcohol, ácido cítrico, oxido amino, sulfato alquilo, carboximetil celulosa.	Lavandería	90	0,04644
Blanqueador	Peróxido de Hidrogeno		80	0,04128
Suavizante	Polímero, suavizante catiónico		80	0,04128
Ambientador de olores	éter de glicol, ftalatos, benzol.	Alojamiento y oficinas	34	0,01755
Ambientador de manos	Tensoactivo aniónico		40	0,02064
Desengrasante de superficie	Tensoactivo aniónico, NaOH	Casino	30	0,01548
Desinfectante de superficies	Alcohol etílico, amoniaco		25	0,01290
Jabón detergente	Triclosan, alquiloetoxisulfato, surfactantes		120	0,06193

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa. 2016.

Continuando con el inventario del ciclo integral del agua se presenta en la siguiente tabla el balance másico de insumos requeridos en el tratamiento de 1 m³ de agua residual doméstica.

Tabla 10. Balance Másico en la PTARd.

Sustancia	Unidad	Succión	Homogenización	Reacción	Clarificación y Desinfección	Disposición Final
Agua residual doméstica	m3	1,62375489	1,542567148	1,388310433	-	-
Hipoclorito de sodio	mL	-	-	-	1,040310	-
Agua depurada	m3	-	-	-	1,110648	1
Lodo	kg	-	-	-	0,060930	-

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa. 2016.

Finalmente en las siguientes tablas se presenta la electricidad consumida por cada unidad de proceso que integra el ciclo integral de 1 m³ de agua en las diferentes plantas de tratamiento, en donde la energía es producida y distribuida por la Electrificadora de Santander “ESSA”, haciendo referencia de que los procesos no utilizan la energía generada en la central hidroeléctrica y que adicionalmente no se cuenta con las cargas de la misma.

Tabla 11. Flujos Energéticos (MJ) en la Planta de Potabilización.

Planta	Sustancia	Captación	Almacenamiento	Floculación	Filtración	Desinfección	Tanques
PTAP (KMnO4)	Energía Pozo	0,213379345	0,213379345	0	0	0	0
	Energía Río	17,99275515	0,038796245	0	0	0	0
	Energía Tratamiento	0	0	1,04749861	0,02521756	0,03879624	0,1745831
PTAP (Ozono)	Energía Pozo	0,213379345	0,213379345	-	-	-	-
	Energía Río	17,99275515	3,471643154	-	-	-	-
	Energía Tratamiento	0	0	1,04749861	0,02521756	0,03879624	0,1745831

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa. 2016.

Tabla 12. Flujos Energéticos en el Campamento El Cedral.

Sustancia	Unidad	Campamento
Energía Eléctrica Global	kWh	67,06

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa. 2016.

Tabla 13. Flujos Energéticos en la Planta de Depuración

Sustancia	Unidad	Succión	Homogenización	Reacción	Clarificación y Desinfección	Disposición Final
Energía	kWh	0,40843813	0,370619782	1,380823415	0,03781835	0,42356546

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa. 2016

En la siguiente tabla se presenta el consumo energético mensual durante el primer semestre del año 2016, requerido en el sistema de tratamiento de agua potable (PTAP), el consumo de energía dentro del campamento (área de oficinas, alojamiento, lavandería, casino, etc.), el sistema de tratamientos de aguas residuales domésticas (PTARd).

Tabla 14. Flujos Energéticos Semestral del CIA

Meses	Consumo Energía (kWh/mensual) PTAP	Consumo Energía (kWh/mensual) Campamento	Consumo Energía (kWh/mensual) PTARd
Enero	46099,55523	124587,6936	7473,751148
Febrero	37199,49027	128640,9012	7520,608522
Marzo	41000,55968	113597,7939	7687,646383
Abril	46169,08699	100695,0571	8031,855942
Mayo	51801,15934	111148,515	8106,325697
Junio	46354,50501	115173,0465	8177,448497
Promedio	44770,72608	115640,5012	7832,939365

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa. 2016

5.5.2.2. Flujos ambientales asociados al Ciclo Integral del Agua. Así mismo se incluyen los flujos o cargas ambientales (contaminantes) asociadas a cada unidad de proceso como de las suposiciones realizadas como se indica en el diagrama de flujo del proceso. La cuantificación de las cargas ambientales generadas en cada unidad de proceso para el tratamiento de 1 m³ de agua potable y residual se definió según el alcance del estudio. En la siguiente tabla se presentan los flujos ambientales para la producción de 1 kg de diésel, la combustión del diésel, la calidad del agua cruda analizada a la entrada de las plantas de tratamiento y la generación de lodos.

Tabla 15. Flujos Ambientales (Cargas ambientales)

Sustancia (kg de contaminante)	Unidad	LODOS PTAP	LODOS PTARD	Combustión Diésel (1 km)	Energía Hidroeléctrica Nacional (1MJ)
Cadmio Total	mg Cd/L	0,005	0,005		
Calcio Total	mg Ca/L	-	55,3		
Calor	MJ			1,5	0,000041
Cobre Total	mg Cu/L	0,01	0,01		
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	450	79000		
Coliformes Totales	NMP/100 mL	7900	130000		
Cromo Total	mg Cr/L	0,05	-		
Dióxido Carbono	kg			1,39	0,0282
Dióxido de Carbono, transformado	kg			-	0,0186
Dióxido Sulfuro				0,002	-
Fosforo Total	mg P/L	-	15,3		
Hidrocarburos no especificados	kg			-	0,00000304

Sustancia (kg de contaminante)	Unidad	LODOS PTAP	LODOS PTARD	Combustión Diésel (1 km)	Energía Hidroeléctrica Nacional (1MJ)
Hollín	kg			-	0,0000156
Material Particulado <2,5 um	kg			0,0003	-
Material Particulado, SPM	kg			-	0,00000223
Metano	kg			5,63-6	0,000305
Monóxido Carbono	kg			0,0016	0,0000116
Oxido de Sulfuro	kg			-	0,0000291
Oxido Nitrógeno	kg			0,0038	0,000088
Ph	pH	7,48	7,31	-	-
Plomo total	mg Pb/L	0,05	0,05		
Sólidos suspendidos totales	mg/L	20350	2040	-	-
Zinc Total	mg Zn/L	0,025	0,0025		

Fuente: Datos de Campo, suministrados por la empresa. 2016.

Adicionalmente se incluye la energía utilizada que proviene del sistema hidroeléctrico del cual se destacan los siguientes impactos ambientales en su producción:

5.5.2.3. Fuentes de Datos. La información utilizada para conformar el inventario de ciclo de vida fue obtenida a través de informes de sostenibilidad, procedimientos y cálculos emitidos por la hidroeléctrica, informes de cumplimiento ambiental presentado por la Corporación Autónoma Regional de Santander “CAS” e información relevante suministrada por los ingenieros de procesos de las plantas de tratamiento.

5.5.2.4. Calidad y Revisión de Información. La eficacia del estudio depende de la calidad de los datos utilizados en el inventario de ciclo de vida, es por ello, que la información utilizada fue validada y aprobada por los responsables de los procesos (Ingenieros de Operación de las plantas de tratamiento de agua potable, agua residual, entre otros), como del equipo de trabajo del estudio (Director y Codirector).

5.5.3. Métodos de Evaluación del Inventario de Ciclo de vida. La evaluación del inventario se realizóa partir del uso del método CML 2001 con el apoyo del Software SimaPro v. 7.1 de PréConsultants y la base de datos Ecoinvent. Los impactos evaluados incluyen: disminución de recursos abióticos, acidificación, eutrofización, calentamiento global, disminución de ozono estratosférico, toxicidad humana y toxicidad terrestre, basados en la revisión del estado del arte. A continuación se describen los ítems relacionados en la evaluación del ICV:

5.5.3.1. Método de selección para la EICV. La metodología de ACV es comparativa y consiste en implementar una base de datos compatible según referencia Colombiana, para todas las unidades de proceso requeridas en el tratamiento de 1 m³ de agua que conforma el ciclo integral del agua en una hidroeléctrica. La información que no se dispuso de algún proceso fue adaptada con datos de otros estudios referenciados en el software seleccionado.

5.5.3.2. Selección de software y método de evaluación. La herramienta utilizada para la elaboración del ACV fue el programa SIMAPRO 7.1®, el método CML 2001 ((all impact categories) V2.04/the Netherlands, 1997) y la base de datos Ecoinvent v.1.3.; versión 2©. El método CML realiza la clasificación de cargas ambientales en categorías de impacto. La base de datos contiene un inventario resultado del trabajo de diferentes institutos que integran las bases de datos ETH-ESU 96, BUWAL 250, entre otras, siendo la más completa actualmente.

5.5.3.3. Selección de categorías de evaluación de impactos. Los impactos ambientales potenciales asociados al sistema de tratamiento de agua referente al estado del arte son: el agotamiento de recursos naturales, la contaminación indirecta a las cuencas hídras por diferentes industrias (avícolas, mineras, mataderos, etc.), el consumo de energía hidroeléctrica y la contaminación por productos químicos. En relación a los impactos ambientales descritos con antelación y con ayuda del método CML 2001 aceptado internacionalmente, se evaluaron todos los impactos adscritos al ciclo integral del agua como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 16. Comparación de Métodos de EICV según el Estado del Arte.

Autor	Software	Base de Datos	Método	Categorías de Impacto
(AMORES, et al., 2012)	SimaPro©	Ecoinvent	CML 2001	Potencial de Acidificación , Potencial de agotamiento abiótico, Potencial de eutrofización, Potencial de Calentamiento Global (GWP 100), Potencial de Agotamiento del ozono, potencial de generación fotoquímica de ozono, Potencial de ecotoxicidad, uso agua fresca y demanda energía acumulada
(FLORES BADOS, 2010).	SimaPro©	Ecoinvent v.1.3 y v.2	CML 2001	Potencial de Acidificación , Potencial de agotamiento abiótico, Potencial de eutrofización, Potencial de Calentamiento Global (GWP 100), Potencial de Agotamiento del ozono, potencial de generación fotoquímica de ozono.
(LEMOS, et al., 2013)	Simapro, versión 7.3.	Ecoinvent 2.0.	ReCiPe 2008.	Cambio climático, el agotamiento de los combustibles fósiles, la eutrofización marina, la acidificación terrestre, toxicidad humana, la formación de oxidantes fotoquímicos, ecotoxicidad marina, y la radiación ionizante.
(QI, et al., 2012)	Gabi 4.0.	Ecoinvent	CML 2001	Potencial de calentamiento global, eutrofización y el ecosistema de agua dulce (opciones de aguas subterráneas, de superficie y de transferencia)
(VARÓN HOYOS, 2015)	Simapro 8.0.2	Ecoinvent	Impact 2002+, 2.1	Efectos cancerígenos y no cancerígenos (Toxicidad humana), Efectos respiratorios por sustancias inorgánicas y orgánicas, Radiación ionizante, Deterioro de la capa de ozono, Oxidación fotoquímica, Ecotoxicidad acuática, Ecotoxicidad terrestre, Acidificación acuática, Eutrofización acuática, Acidificación/Nutrificación terrestre, Ocupación de suelo, Calentamiento global, Energía no renovable, Extracción de minerales
(VENKATESH, et al., 2011)	Simapro 7.1.5®,	Ecoinvent	CML 2001	Potencial de Acidificación , Potencial de agotamiento abiótico, Potencial de eutrofización, Potencial de Calentamiento Global (GWP 100), Potencial de Agotamiento del ozono, potencial de generación fotoquímica de ozono.
Vince F., et al. (2008).	Gabi 4.2	Ecoinvent	Impact 2002+	Calentamiento global, Extracción mineral, consumo de energía no renovable, radiación ionizante, efectos respiratorios, agotamiento de la capa de ozono, oxidación fotoquímica, y nitrificación y acidificación terrestre.

Fuente: Autor

Según las emisiones atmosféricas identificadas en los diferentes sistemas de tratamiento y de la clasificación de las categorías desarrolladas por el método CML 2001 en otros estudios; las

categorías de impacto influyentes por dichas emisiones y que son relevantes en el contexto el estudio son:

- Agotamiento de recursos abióticos.
- Acidificación.
- Eutrofización.
- Calentamiento global.
- Toxicidad humana.
- Formación de ozono.
- Oxidación Fotoquímica.

En el Anexo D se presentan las unidades de las categorías de evaluación adscritas al método CML 2001.

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Posterior a la revisión del estado del arte y marco teórico e identificados los procesos que integran el ciclo integral del agua (sistema de captación y abastecimiento, planta de potabilización de agua, sistema de distribución y consumo de agua en el campamento, sistema de tratamiento de agua residual), se procedió a la recolección del inventario base del estudio (descripción de procesos, cuantificación de balances másicos, energéticos y ambientales) con el fin de implementar la metodología de análisis de ciclo de vida como se presentó en el literal anterior. A continuación se presenta la interpretación y análisis de resultados obtenidos como etapa final del análisis de ciclo de vida.

6.1. Análisis de Impacto Ambiental potencial para la Planta de Potabilización usando Permanganato de Potasio.

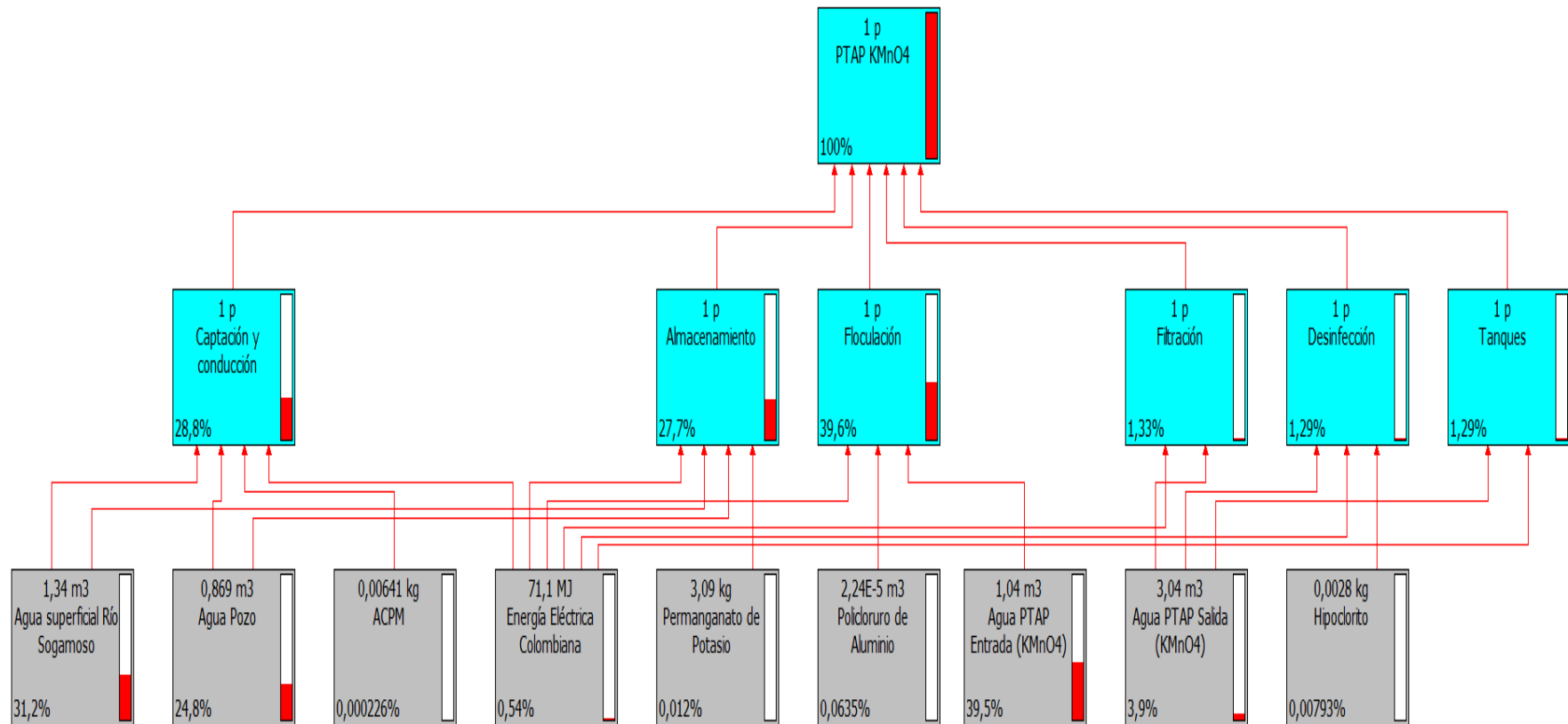
El primer análisis realizado fue la contribución ambiental dada por las cargas ambientales asociadas a cada etapa que integra el proceso de potabilización de 1 m³ usando el permanganato de potasio como antioxidante, exceptuando la contribución ambiental por la generación de lodos. En la Figura 13 se presenta el árbol de procesos para las diferentes etapas de potabilización (captación y distribución, almacenamiento, floculación, filtración, desinfección y tanques de almacenamiento) cajas de color magenta y la carga ambiental (cajas de color gris), atribuidas por el consumo de químicos, captación de aguas, consumo energético, entre otros.

6.1.1. Análisis de Contribución Ambiental PTAP-KMnO₄. De la figura es importante destacar la participación ambiental dada en la etapa de floculación en un 39% asociada por el consumo de químicos (PAC, Acuaflex), energía eléctrica (sistema de dosificación) y los metales presentes en el agua mix (agua de pozo y agua superficial del Río Sogamoso) a tratar. Sigue la contribución ambiental de las etapas de captación y distribución de agua del Río Sogamoso y

del pozo como de la etapa de pre-almacenamiento y regulación de pH y acidez con un valor de contribución del 28,8% y 27,7% respectivamente. Estos impactos se atribuyen al consumo de químicos (soda cáustica, sulfato de aluminio, permanganato de potasio).

Finalmente se presenta el aporte de las etapas con menor carga ambiental como son la filtración, la desinfección y el almacenamiento final atribuidos al uso de carbón activado, consumo de hipoclorito de calcio y consumos de energía para la dosificación de químicos, recirculación del agua y almacenamiento posterior. Las cargas ambientales fueron del 1,33%; 1,29% y 1,29% respectivamente.

Figura 13. Árbol de proceso de la Planta de Tratamiento de Agua Potable con permanganato de potasio (corte de visualización del 0.0005%).



Fuente: Simpro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.O4.

6.1.2. Análisis de Caracterización PTAP-KMnO₄. El análisis de caracterización permite evidenciar la contribución ambiental para las diferentes etapas de proceso y su afectación a las categorías de estudio más relevantes según el método de evaluación CML 2001. En la siguiente tabla se aprecia la contribución asociada por la caracterización de cada etapa de estudio (captación, almacenamiento, floculación, filtración, desinfección y tanques de almacenamiento) de la PTAP usando permanganato de potasio, respecto a las categorías de evaluación definidas por el método CML 2001.

Tabla 17. Resultados de caracterización global de la planta PTAP-KMnO₄.

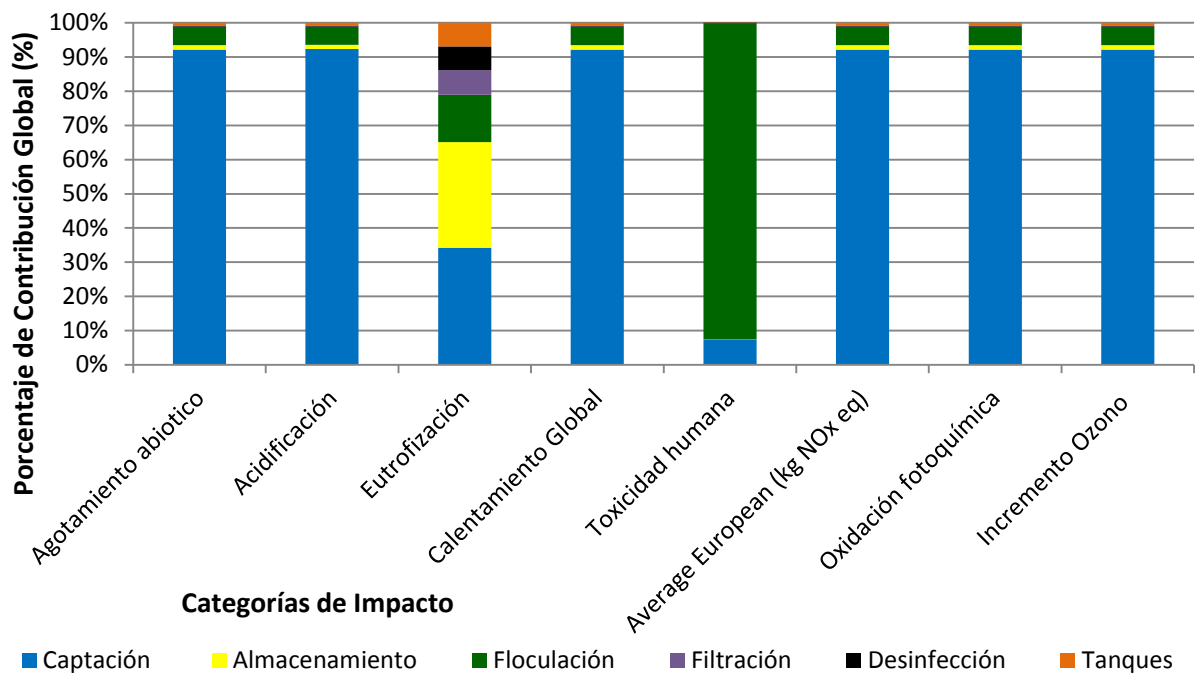
Categoría de impacto	Unidad	Captación	Almacenamiento	Floculación	Filtración	Desinfección	Tanques	Total
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	1E-02	2E-04	9E-04	2E-05	3E-05	1E-04	2E-02
Acidificación	kg SO ₂ eq	5E-01	7E-03	3E-02	7E-04	1E-03	5E-03	6E-01
Eutrofización	kg PO ₄ eq	9E-01	8E-01	4E-01	2E-01	2E-01	2E-01	3E+00
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	1E+01	2E-01	8E-01	2E-02	3E-02	1E-01	1E+01
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	7E-01	1E-02	9E+00	1E-03	1E-03	7E-03	1E+01
Average European (kg NO _x eq)	kg NO _x eq	7E-01	1E-02	4E-02	1E-03	1E-03	7E-03	8E-01
Oxidación fotoquímica	kg C ₂ H ₄	1E-02	1E-04	6E-04	1E-05	2E-05	1E-04	1E-02
Máximo Incremento Ozono	kg formed O ₃	1E-03	2E-05	8E-05	2E-06	3E-06	1E-05	2E-03

Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

En la siguiente figura se aprecia la caracterización relacionada a la contribución ambiental por categoría tal como se presentó en la tabla anterior, de la cual se puede evidenciar que la etapa de mayor contribución ambiental fue la captación y distribución sobre un 90% comparada a las demás etapas de proceso a excepción de las categorías de eutrofización y toxicidad humana.. Esta contribución obedece principalmente al consumo de energía por bombeo del agua desde el Río Sogamoso y del pozo, y su conducción hasta el sistema de almacenamiento previo. Las siguientes etapas que contribuyen al proceso fueron la floculación y el sistema de almacenamiento inicial, con un porcentaje promedio del 6% y 2% para cada etapa, asociado al uso de químicos y consumo de energía eléctrica en el sistema de dosificación, como de las sustancias químicas presentes en el agua a tratar.

Según la caracterización ambiental se determina que las etapas que no contribuyen de forma negativa al proceso fueron las etapas de filtración, desinfección y el almacenamiento final del agua tratada, dado a que su contribución es menor del 0,9% del impacto en todas las categorías de estudio. La justificación de la contribución menor, radica en que las etapas tienen un bajo consumo de energía como de insumos químicos (carbón activado e hipoclorito de calcio), al igual que la calidad del agua tratada según su caracterización es mejor comparada al agua cruda que ingresa en las etapas iniciales.

Figura 14. Caracterización global del Impacto Ambiental Potencial - Planta PTAP consumo KMnO4.



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

6.1.3. Análisis por Atributos PTAP-KMnO4. Este análisis permite realizar la descripción e interpretación sobre la caracterización del perfil medio ambiental (impactos ambientales potenciales) para las categorías de impacto estudiadas según el método de evaluación CML 2001. Este análisis se presenta en primera instancia para el proceso de potabilización que utiliza permanganato de potasio. En la siguiente tabla se puede apreciar el porcentaje de

contribución de cada etapa de proceso frente a las categorías de estudio evaluadas. De la interpretación es de mencionar que las categorías: agotamiento de recursos abióticos, el calentamiento global, emisión de NOx (europeo medio), la oxidación fotoquímica y la formación de ozono (máximo incremento) presentan el mismo porcentaje de participación ambiental por las diferentes etapas del proceso, a excepción de las categorías de eutrofización y toxicidad humana.

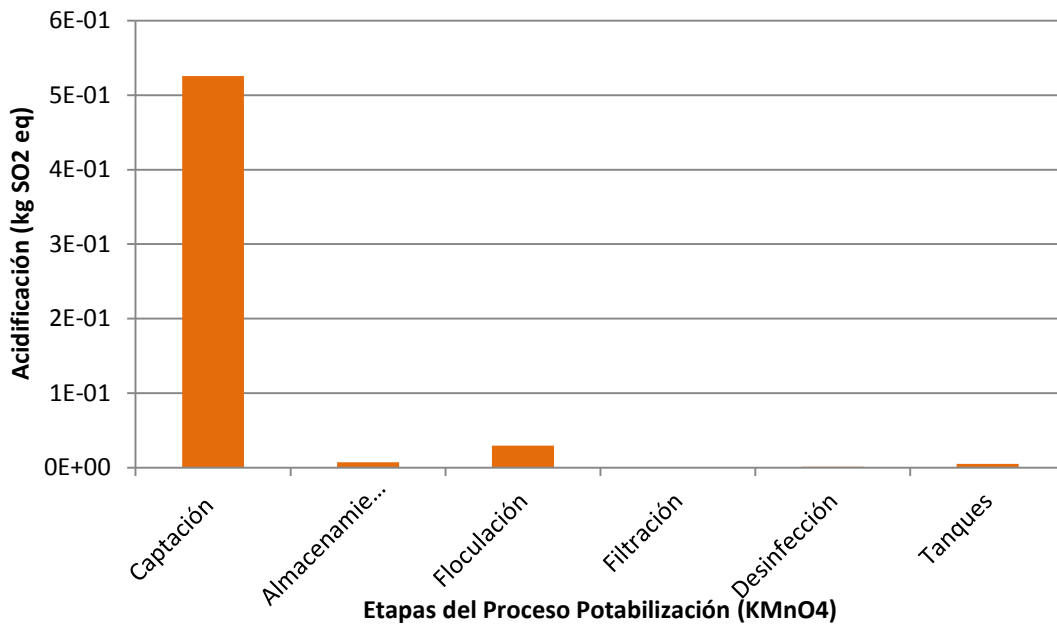
Tabla 18. Resultados de Análisis por Atributos para la planta PTAP-KMnO4.

Categoría de impacto	Unidad	Captación	Almacenamiento	Floculación	Filtración	Desinfección	Tanques
Acidificación	kg SO2 eq	92,32%	1,26%	5,23%	0,13%	0,19%	0,87%
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	92,21%	1,28%	5,31%	0,13%	0,20%	0,88%
Calentamiento Global	kg CO2 eq	92,21%	1,28%	5,31%	0,13%	0,20%	0,88%
Average European (kg NOx eq)	kg NOx eq	92,21%	1,28%	5,31%	0,13%	0,20%	0,88%
Oxidación fotoquímica	kg C2H4	92,21%	1,28%	5,30%	0,13%	0,20%	0,88%
Máximo Incremento Ozono	kg formado O3	92,21%	1,28%	5,31%	0,13%	0,20%	0,88%
Eutrofización	kg PO4 eq	34,22%	30,88%	13,88%	7,17%	6,91%	6,93%
Toxicidad humana	kg1,4DB eq	7,28%	0,10%	92,52%	0,01%	0,02%	0,07%

Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

Con los resultados presentados en la tabla anterior, se graficó el perfil medioambiental de las categorías de impacto, para ver su respectiva contribución por etapa de proceso. En la siguiente figura se presenta la contribución ambiental para la categoría Acidificación (kg SO2 eq), que es afectada por el consumo de energía eléctrica y el uso de ACPM, materias primas que emiten óxidos de nitrógeno y azufre durante su uso.

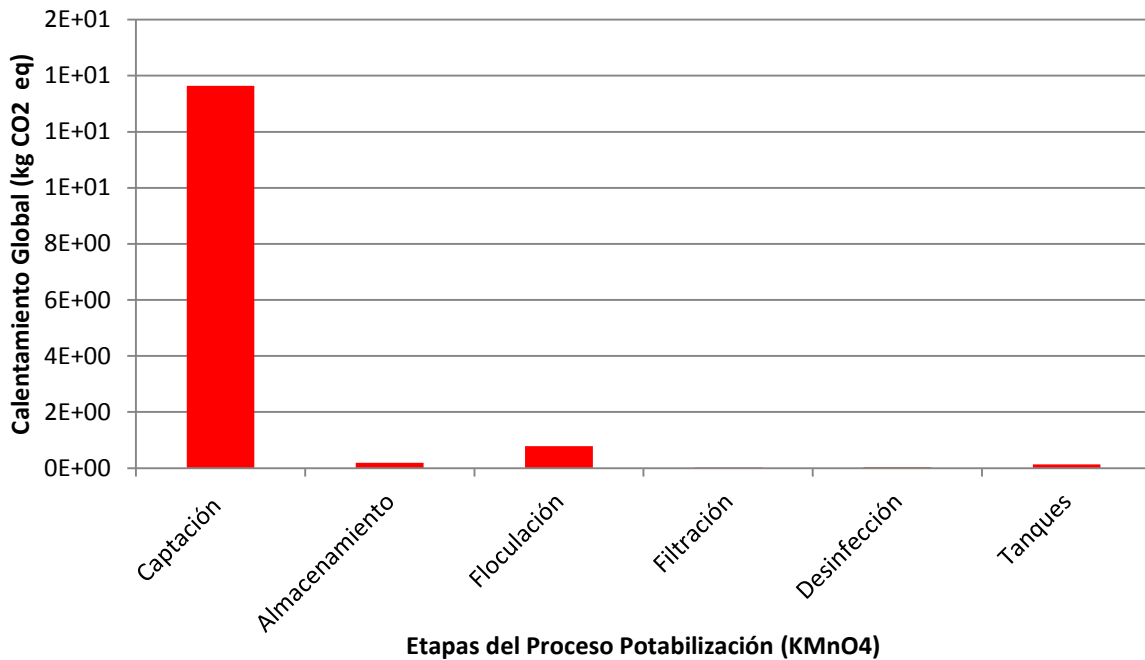
Figura 15. Perfil medioambiental para la categoría Acidificación - Planta PTAP consumo KMnO4.



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

De la figura anterior, cabe resaltar que la categoría de acidificación se ve afectada en mayor proporción por la etapa de captación y conducción (92,32%), seguido de la floculación (5,23%), almacenamiento previo (1,26%) y en menor contribución las etapas de almacenamiento final, desinfección y filtración con una contribución del 0,87%, 0,19% y 0,13% respectivamente. En la siguiente figura se presenta el comportamiento del perfil medioambiental para la categoría calentamiento global (kg CO2 eq). Al igual que la categoría de acidificación esta categoría se ve afectada en mayor proporción por las etapas: captación (92,21%), floculación (5,31%), almacenamiento previo (1,28%), almacenamiento final (0,88%), desinfección (0,20%) y filtración (0,13%).

Figura 16. Perfil medioambiental para la categoría Calentamiento global- Planta PTAP consumo KMnO4.

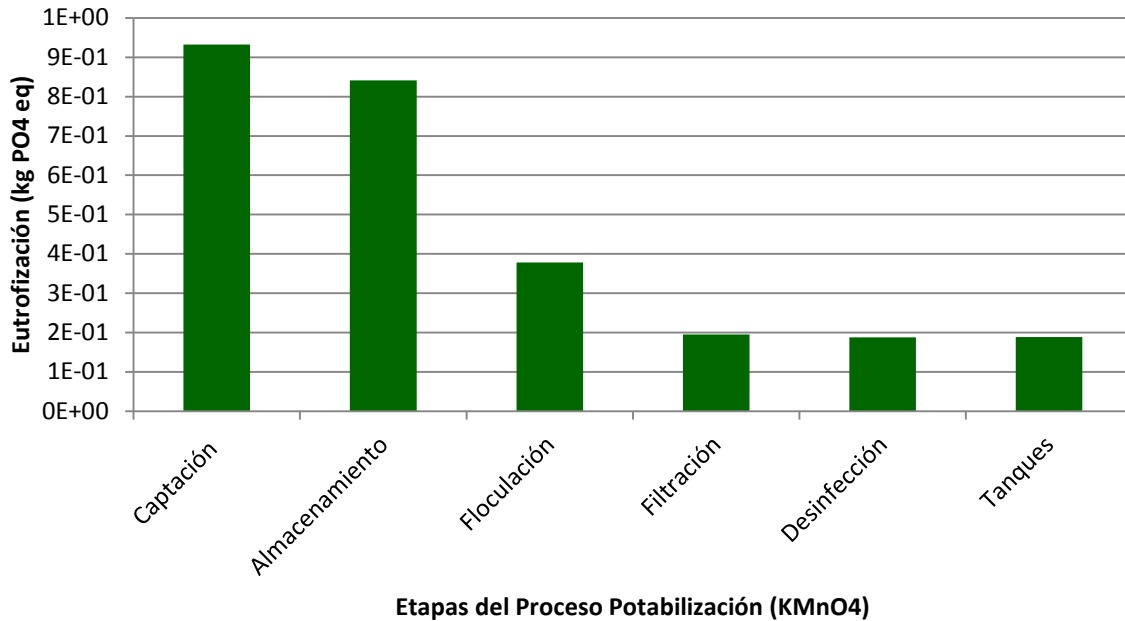


Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

Como se describió anteriormente las categorías de calentamiento global, la oxidación fotoquímica, la formación de ozono (máximo incremento) y emisión de NOx (europea medio) poseen el mismo porcentaje de participación en las diferentes categorías y según el perfil medio ambiental reflejan el impacto ambiental potencial obtenido, por causa de las emisiones de metano, monóxido y dióxido de carbono y algunos hidrocarburos generados por el consumo de energía eléctrica y de ACPM.

En la siguiente figura se presenta el perfil medio ambiental para la categoría eutrofización (kg PO4 eq). Estos impactos fueron obtenidos en las diferentes etapas de proceso principalmente en la captación (34,22%), almacenamiento previo (30,88%), floculación (13,88%), filtración (7,17%), tanques de almacenamiento (6,93%) y finalmente la etapa de desinfección (6,91%).

Figura 17. Perfil medioambiental para la categoría Eutrofización- Planta PTAP consumo KMnO4.

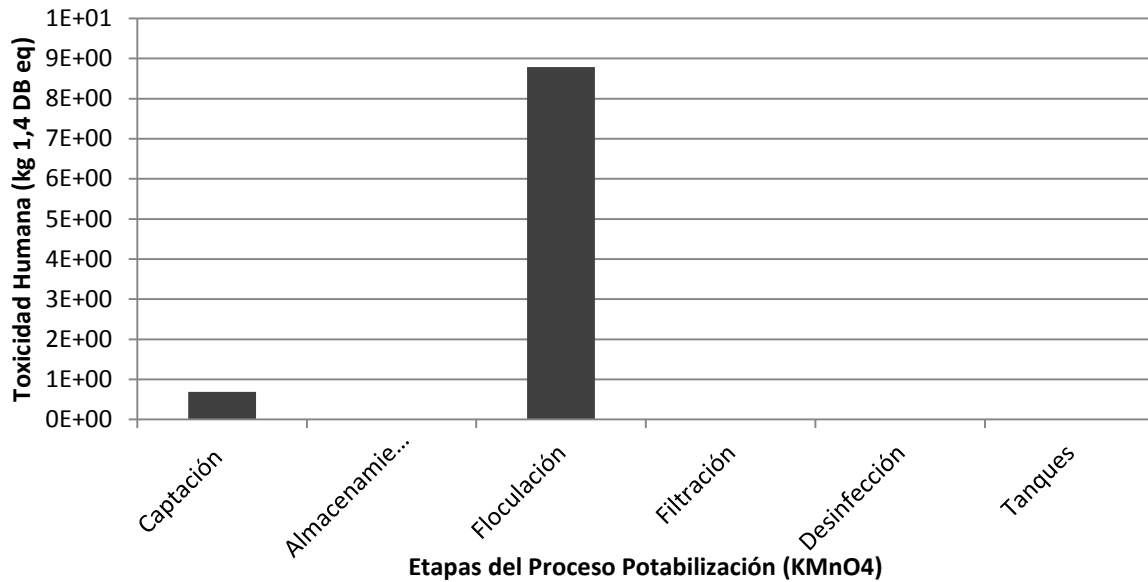


Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

Esta categoría se ve afectada por la presencia de nitratos, nitritos, óxidos de nitrógeno y algunos metales presentes en la caracterización del agua de pozo, agua superficial, energía eléctrica y combustible (ACPM).

Finalmente en la siguiente figura se presenta el perfil medio ambiental para la categoría de toxicidad humana (kg 1,4 DB eq). Esta categoría se afectó principalmente por las etapas de floculación (92,52%) y el sistema de captación y conducción (7,28%). Las demás etapas tuvieron una contribución menor al 0,1%. El impacto de la categoría obedece a los contaminantes presentes en el agua de pozo y agua superficial, básicamente plomo, cobre, cianuro, sulfatos, entre otros; como del consumo de químicos (Soda cáustica, Sulfato de aluminio, Acuaflex y Policloruro de Aluminio).

Figura 18. Perfil medioambiental para la categoría Toxicidad Humana- Planta PTAP consumo KMnO4.



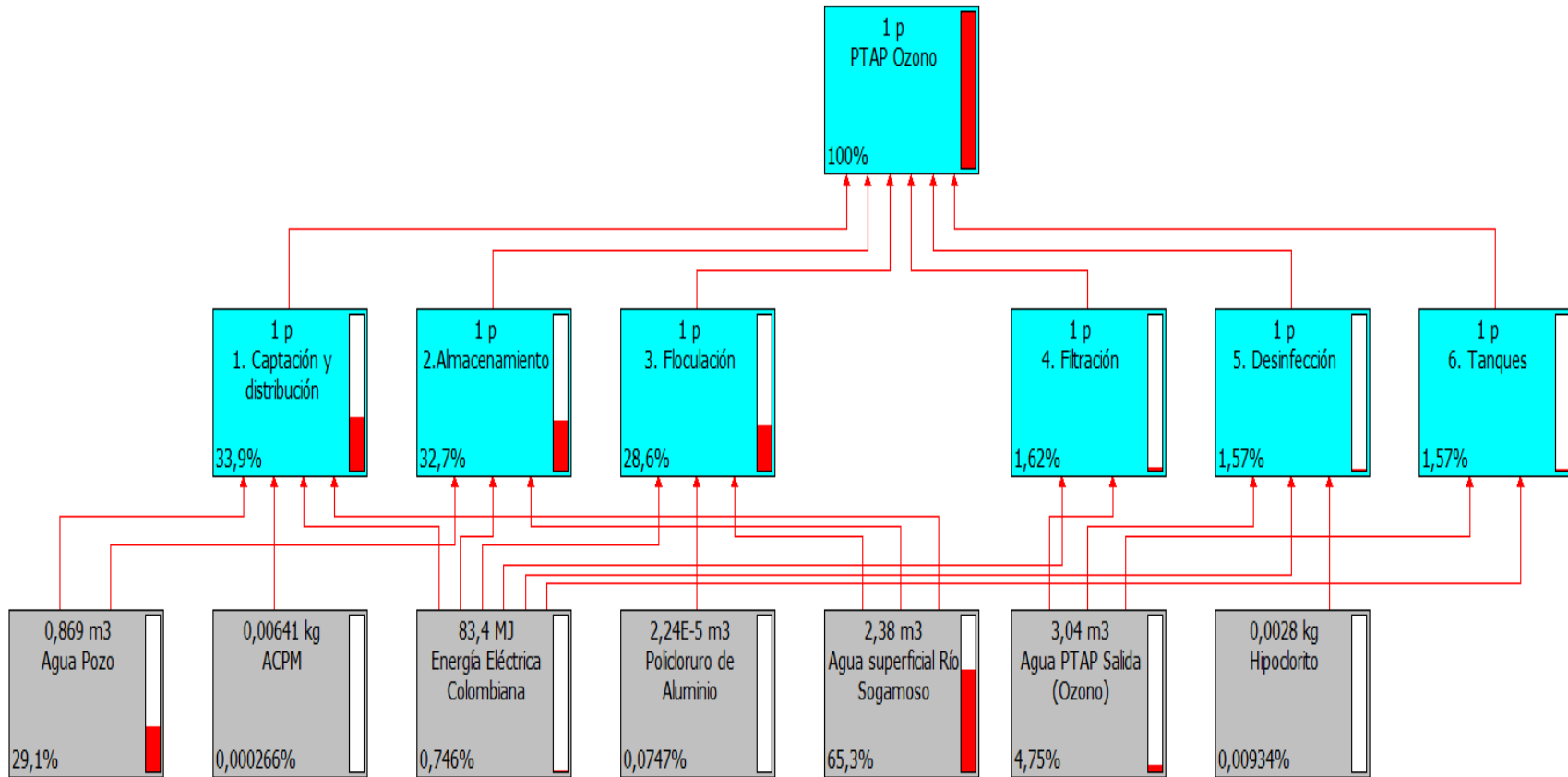
Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

6.2. Análisis de Impacto Ambiental potencial para la Planta de Potabilización usando Ozono.

Al igual que el análisis de impacto ambiental potencial realizado al proceso de potabilización de 1 m³ de agua utilizando permanganato de potasio, se realizó el análisis con ozono sin incluir el impacto asociado por la generación de lodos. En la **Figura 19** se presenta el árbol de procesos para las diferentes etapas de potabilización (captación y distribución, almacenamiento, floculación, filtración, desinfección y tanques de almacenamiento) cajas de color magenta y la carga ambiental (cajas de color gris), atribuidas por el consumo de químicos, captación de aguas, consumo energético, entre otros.

6.2.1. Análisis de Contribución Ambiental PTAP-KMnO4. De la figura es importante destacar la participación ambiental dada en la etapa de captación y conducción en un 33,9% asociada por el consumo de químicos (Soda cáustica, sulfato de aluminio), energía eléctrica (sistema de dosificación y sistema de bombeo) y los metales presentes en el agua mix (agua de pozo y agua superficial del Río Sogamoso) a tratar.

Figura 19. Árbol de proceso de la Planta de Tratamiento de Agua Potable con ozono (corte de visualización del 0.0005%).



Fuente: Simpro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.O4.

Respecto a la contribución ambiental sigue el impacto asociado a la etapa de pre-almacenamiento y regulación de pH y acidez con un valor de contribución del 32,7% (uso de peróxido de hidrógeno y oxígeno) seguido de la etapa de floculación en un 28,6% asociado al consumo de químicos (Acuaflex y Policloruro de aluminio) y energía eléctrica (sistema de recirculación de agua y dosificación de químicos). Finalmente se presenta el aporte de las etapas con menor carga ambiental como fueron la filtración, la desinfección y el almacenamiento final, atribuidos al uso de carbón activado, consumo de hipoclorito de calcio y consumos de energía requeridos en la dosificación de químicos, recirculación del agua y almacenamiento de la misma. Las cargas ambientales fueron del 1,62%; 1,57% y 1,57% respectivamente.

6.2.2. Análisis de Caracterización PTAP-Ozono. Esta caracterización evidencia la contribución ambiental para todas las etapas de proceso. En la siguiente tabla se aprecia la contribución asociada a la caracterización de cada etapa de estudio (captación, almacenamiento, floculación, filtración, desinfección y tanques de almacenamiento) de la PTAP usando ozono, respecto a las categorías de evaluación definidas por el método CML 2001.

Tabla 19. Resultados de caracterización global de la planta PTAP-Ozono.

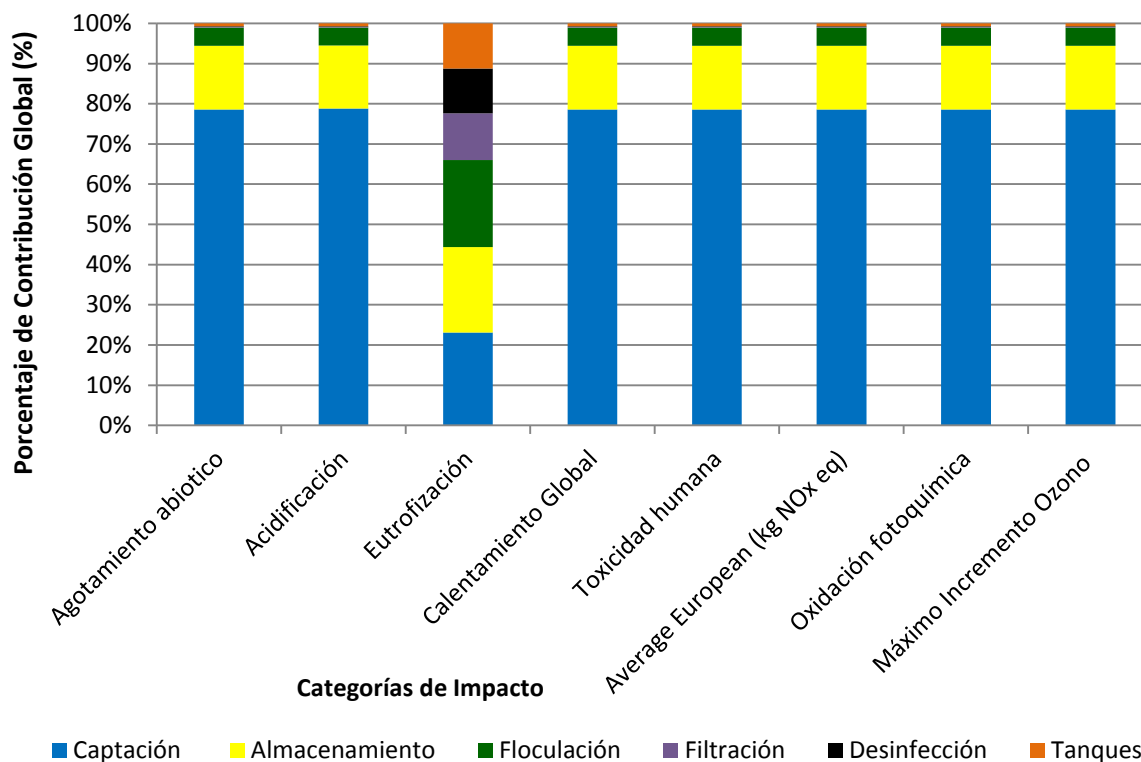
Categoría de impacto	Unidad	Captación	Almacen.	Floculación	Filtración	Desinfección	Tanques	Total
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	1E-02	3E-03	9E-04	2E-05	3E-05	1E-04	2E-02
Acidificación	kg SO ₂ eq	5E-01	1E-01	3E-02	7E-04	1E-03	5E-03	7E-01
Eutrofización	kg PO ₄ eq	9E-01	9E-01	9E-01	5E-01	5E-01	5E-01	4E+00
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	1E+01	3E+00	8E-01	2E-02	3E-02	1E-01	2E+01
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	7E-01	1E-01	4E-02	1E-03	1E-03	7E-03	9E-01
Average European (kg NO _x eq)	kg NO _x eq	7E-01	1E-01	4E-02	1E-03	1E-03	7E-03	9E-01
Oxidación fotoquímica	kg C ₂ H ₄	1E-02	2E-03	6E-04	1E-05	2E-05	1E-04	1E-02
Máximo Incremento Ozono	kg formad O ₃	1E-03	3E-04	8E-05	2E-06	3E-06	1E-05	2E-03

Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

En la **Figura 20** se presenta la caracterización relacionada a la contribución ambiental por categoría tal como se presentó en la tabla anterior, de la cual se evidencia que la etapa de mayor contribución ambiental fue la captación y distribución sobre un 72% comparada a las

demás etapas de proceso. Esta contribución obedece principalmente al consumo de energía por bombeo del agua desde el Río Sogamoso y del pozo, y su conducción hasta el sistema de almacenamiento previo, como sucedió con el escenario de permanganato de potasio. Las etapas que menor contribución dan al proceso fueron: la floculación y el sistema de almacenamiento inicial, con un porcentaje promedio del 16% y 5% para cada etapa, asociado al uso de químicos y consumo de energía eléctrica en el sistema de dosificación, como de las sustancias químicas presentes en el agua a tratar, seguido de la filtración 0,11%, desinfección 0,17% y tanques de almacenamiento final 0,75%.

Figura 20. Caracterización global del Impacto Ambiental Potencial - Planta PTAP consumo Ozono.



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

De la figura anterior también se puede apreciar que todas las categorías a excepción de la categoría Eutrofización poseen el mismo nivel de contribución ambiental en relación a las etapas del proceso estudiadas.

6.2.3. Análisis por Atributos PTAP-Ozono. En la siguiente tabla se puede apreciar el porcentaje de contribución de cada etapa de proceso frente a las categorías de estudio evaluadas. De la interpretación es de mencionar que las categorías: agotamiento de recursos abióticos, el calentamiento global, toxicidad humana, emisión de NOx (europeo medio), la oxidación fotoquímica y la formación de ozono (máximo incremento) presentan el mismo porcentaje de participación ambiental, para las diferentes etapas del proceso, a excepción de la categoría de acidificación y eutrofización.

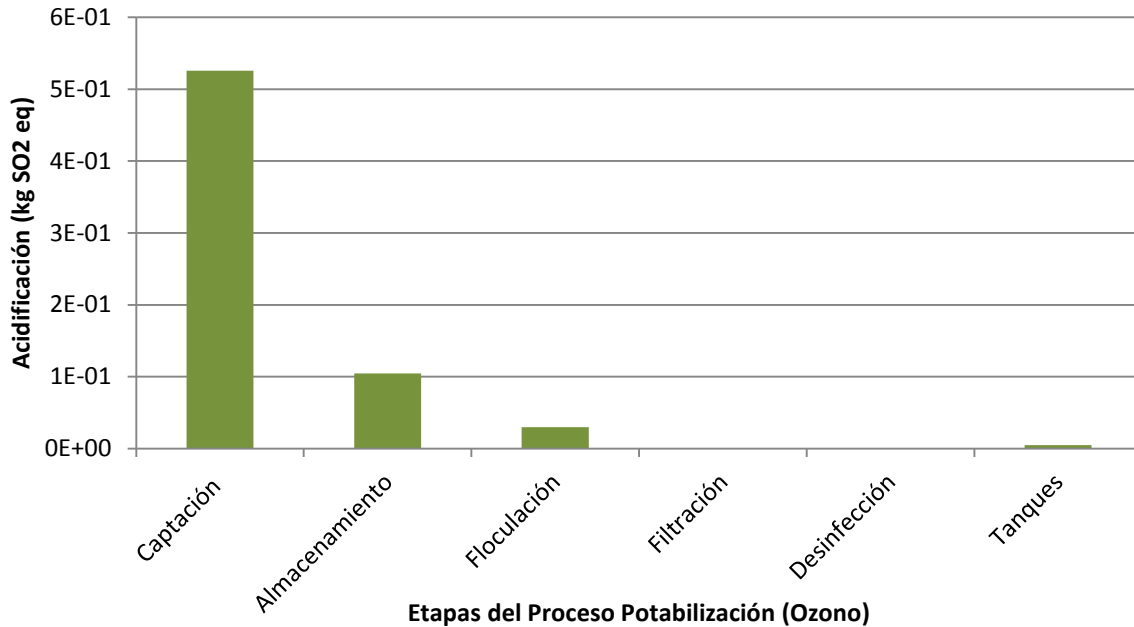
Tabla 20. Resultados de Análisis por Atributos para la planta PTAP-Ozono.

Categoría de impacto	Unidad	Captación	Almacenamiento	Floculación	Filtración	Desinfección	Tanques
Acidificación	kg SO2 eq	78,81%	15,70%	4,46%	0,11%	0,17%	0,74%
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	78,55%	15,90%	4,52%	0,11%	0,17%	0,75%
Calentamiento Global	kg CO2 eq	78,55%	15,90%	4,52%	0,11%	0,17%	0,75%
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	78,55%	15,90%	4,52%	0,11%	0,17%	0,75%
Average European (kg NOx eq)	kg NOx eq	78,55%	15,90%	4,52%	0,11%	0,17%	0,75%
Oxidación fotoquímica	kg C2H4	78,55%	15,90%	4,52%	0,11%	0,17%	0,75%
Máximo Incremento Ozono	kg formed O3	78,55%	15,90%	4,52%	0,11%	0,17%	0,75%
Eutrofización	kg PO4 eq	23,13%	21,22%	21,61%	11,62%	11,20%	11,21%

Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

Respecto a los resultados anteriores, se graficó el perfil medioambiental de las categorías de impacto, como se muestra a continuación. En la siguiente figura se presenta la contribución ambiental para la categoría Acidificación (kg SO2 eq) afectada por el consumo de energía eléctrica y el uso de ACPM, materias primas que emiten óxidos de nitrógeno y azufre durante su uso.

Figura 21. Perfil medioambiental para la categoría Acidificación - Planta PTAP consumo ozono.



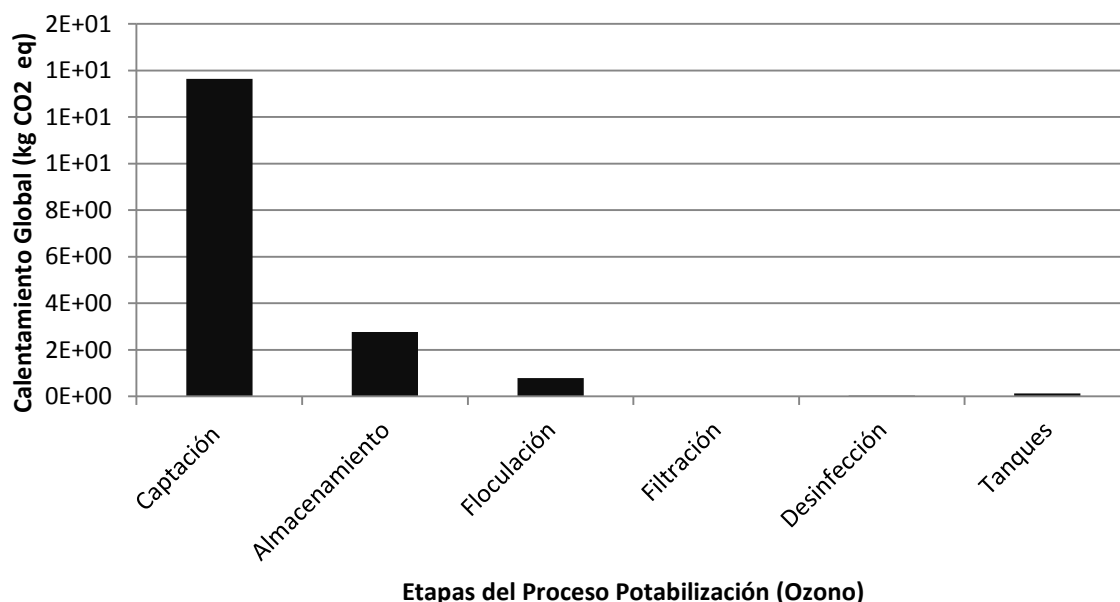
Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

Según la categoría de acidificación esta se ve afectada en mayor proporción por la etapa de captación y conducción (78,81%), seguido del almacenamiento previo (15,7%) y de la floculación (4,46%); y en menor contribución las etapas de filtración, desinfección y almacenamiento final, con una contribución del 0,11%, 0,17% y 0,74% respectivamente.

En la

Figura 22 se presenta el comportamiento del perfil medioambiental para la categoría Calentamiento global (kg CO2 eq). Esta categoría se ve afectada en mayor proporción por las etapas: captación (78,55%), almacenamiento previo (15,90%), floculación (4,52%), filtración (0,13%), desinfección (0,20%) y almacenamiento final (0,75%).

Figura 22. Perfil medioambiental para la categoría Calentamiento global- Planta PTAP consumo Ozono.



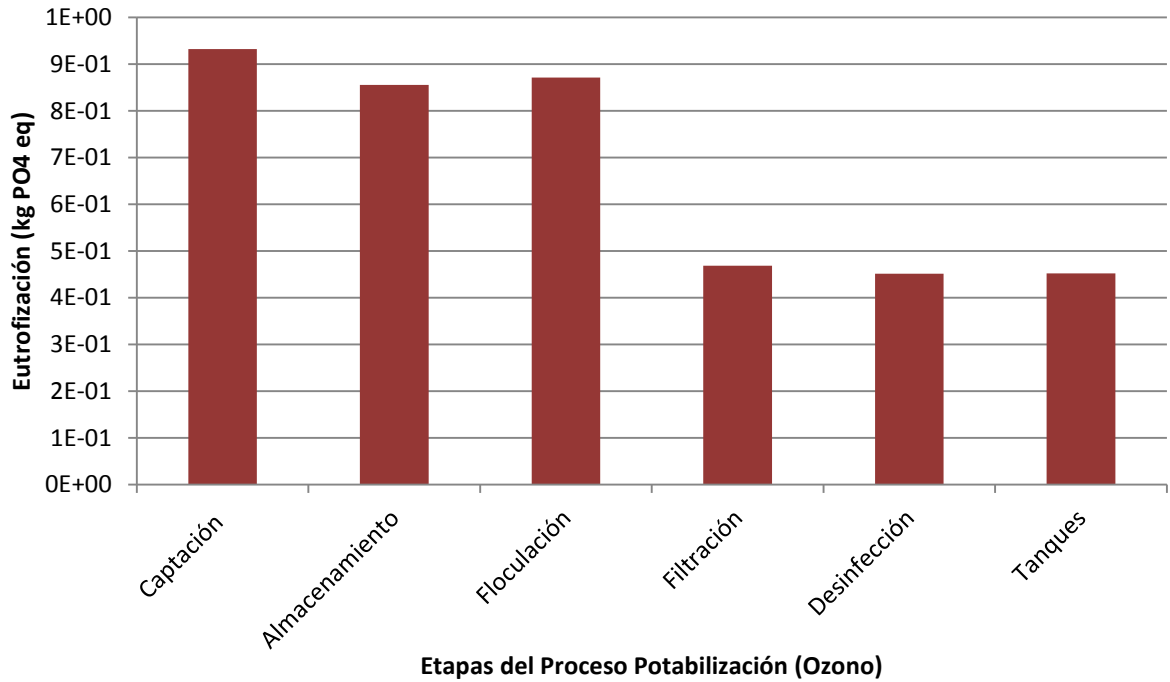
Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

El comportamiento antes descrito se presenta de igual forma para las categorías agotamiento de recursos abióticos, toxicidad humana, emisión de NOx (europea medio), la oxidación fotoquímica y la formación de ozono (máximo incremento), en donde, el perfil medio ambiental refleja el impacto ambiental potencial obtenido, por causa de las emisiones de metano, monóxido y dióxido de carbono y algunos hidrocarburos generados por el consumo de energía eléctrica y de ACPM.

En la Figura 23 se presenta el perfil medio ambiental para la categoría eutrofización (kg PO4 eq). Estos impactos fueron obtenidos en las diferentes etapas de proceso principalmente en la captación (23,13%), almacenamiento previo (21,22%), floculación (21,61%), filtración (11,62%), tanques de almacenamiento (11,21%) y finalmente la etapa de desinfección (11,20%). Esta

categoría se ve afectada por la presencia de nitratos, nitritos, óxidos de nitrógeno y algunos metales presentes en la caracterización del agua de pozo, agua superficial, energía eléctrica y combustible (ACPM).

Figura 23. Perfil medioambiental para la categoría Eutrofización- Planta PTAP consumo Ozono.



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

6.3. Análisis Comparativo para la Planta de Potabilización usando Permanganato de Potasio vs Ozono.

A continuación se presenta el análisis comparativo de impacto ambiental potencial para la potabilización de 1 m³ de agua utilizando como agente oxidante de metales permanganato de potasio (último uso Julio/2016) y el sistema de inyección de ozono (uso actual). El análisis inició con los resultados de la caracterización global presentados en la siguiente tabla, de la cual se puede visualizar que el uso de ozono impactó en mayor proporción (aproximadamente 15%) para todas las categorías a excepción de la eutrofización (32% aproximadamente), lo anterior

se debe principalmente al aumento en el consumo de energía (3,43 kWh) en el sistema de ozono.

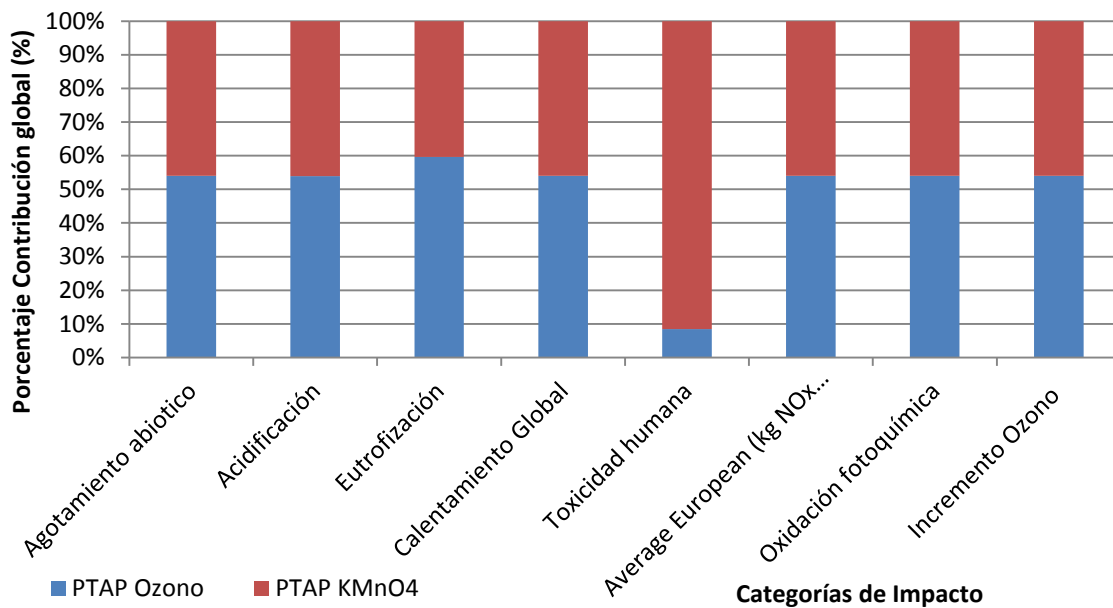
Tabla 21. Resultados de caracterización global para la comparación de la planta PTAP usando permanganato de potasio vs Ozono.

Categoría de impacto	Unidad	PTAP Ozono	PTAP KMnO4
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	0,0191	0,0162
Acidificación	kg SO2 eq	0,6669	0,5693
Eutrofización	kg PO4 ⁻⁻⁻ eq	4,0295	2,7235
Calentamiento Global	kg CO2 eq	17,3658	14,7938
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	0,8807	9,5005
Average European (kg NOx eq)	kg NOx eq	0,8807	0,7503
Oxidación fotoquímica	kg C2H4	0,0135	0,0115
Incremento Ozono	kg formed O3	0,0018	0,0015

Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

Otra diferencia entre los dos casos, es el gran impacto que hay en la categoría de la toxicidad humana puesto que el escenario de KMnO4 afecta la misma en un 92% mayor al uso de ozono, la explicación radica en el consumo de químicos para la oxidación de metales presentes en el agua. El análisis comparativo se puede visualizar en la siguiente figura.

Figura 24. Caracterización global del Impacto Ambiental Potencial comparativo de la Planta PTAP usando KMnO4 versus Ozono.



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

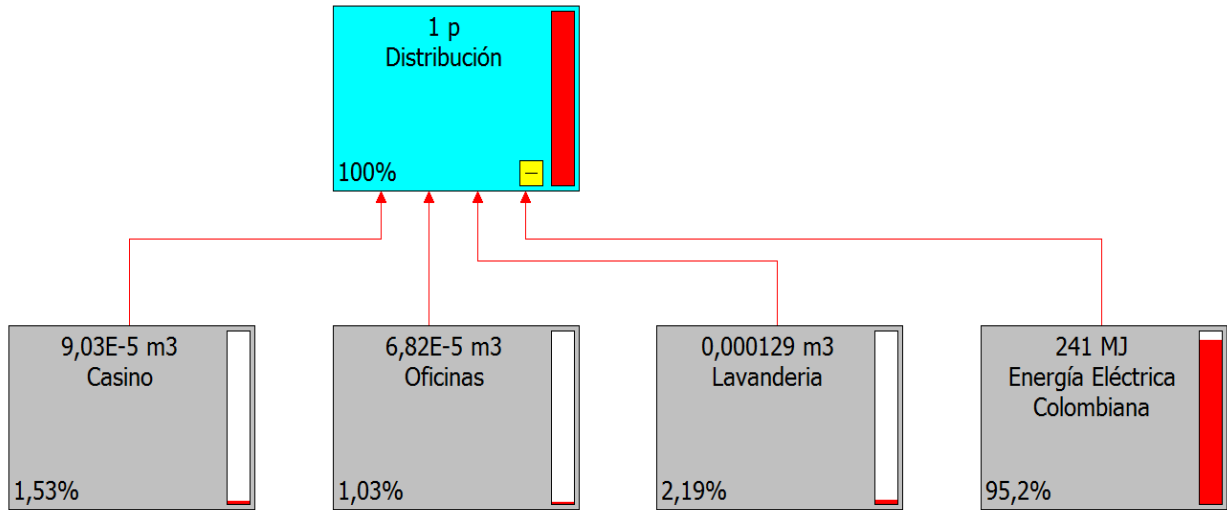
6.4. Análisis de Impacto Ambiental potencial para la etapa de Distribución y consumo del Campamento El Cedral.

Este literal contiene el análisis de impacto ambiental potencial realizado al proceso de distribución y consumo de 1 m³ de agua potable dentro de las instalaciones del Campamento el Cedral. Cabe mencionar que solo se tuvieron en cuenta los insumos de aseo y consumos de energía eléctrica en las áreas de lavandería, oficinas, alojamiento y casino (ver Tabla 9 y

Tabla 12). No se contemplaron los insumos de aseo personal (jabon, shampoo, cremas, etc.), así como los residuos sólidos generados en las instalaciones ya que estos son dispuestos finalmente por una empresa contratista.

6.4.1. Análisis de Contribución Ambiental para la etapa de Distribución y consumo. En la Figura 25 se presenta el árbol de procesos para la etapa de distribución y consumo de 1 m³ de agua potable y su carga ambiental (cajas de color gris), atribuidas por el consumo de químicos, consumo de agua y consumo energético. De la figura es importante destacar la participación ambiental dada por el consumo de energía eléctrica (95,2%) utilizada en todo el campamento (oficinas, casino, hospedaje, etc.).

Figura 25. Árbol de proceso de la etapa de Distribución y Consumo de Agua (corte de visualización del 0.01%).



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

6.4.2. Análisis de Caracterización para la etapa de Distribución y consumo. En la siguiente tabla se aprecia la caracterización ambiental dada por los diferentes consumos (energía, detergentes, agua, etc.) en la etapa de distribución y consumo de agua dentro del Campamento El Cedral y su influencia respecto a las categorías de evaluación definidas por el método CML 2001.

Tabla 22. Resultados de caracterización global de la etapa de Distribución y Consumo de Agua

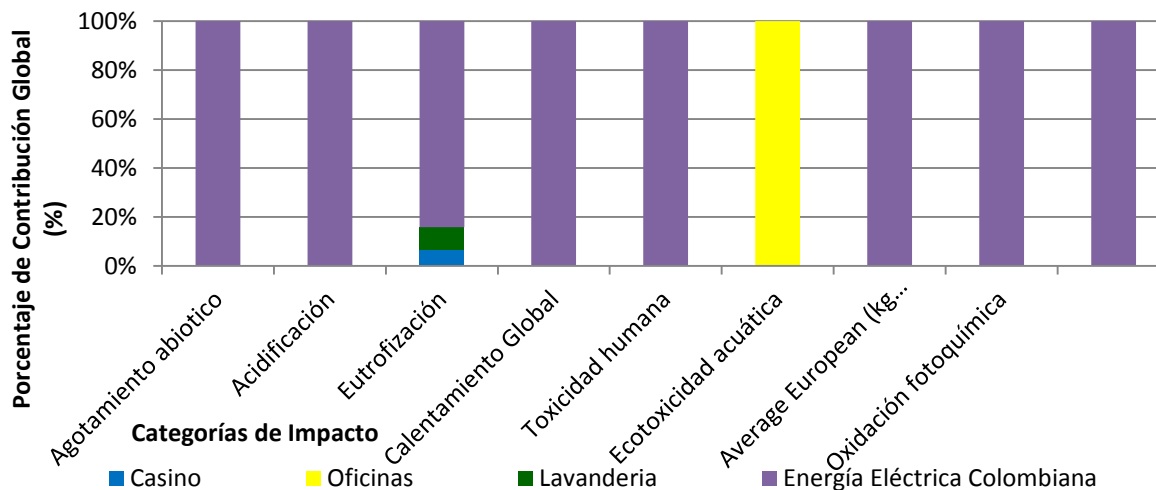
Categoría de impacto	Unidad	Casino	Oficinas	Lavandería	Energía Eléctrica
Agotamiento abiotico	kg Sb eq	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,52E-02
Acidificación	kg SO2 eq	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,91E+00
Eutrofización	kg PO4 eq	2,21E-02	0,00E+00	2,98E-02	2,76E-01
Calentamiento Global	kg CO2 eq	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,02E+01
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	0,00E+00	4,11E-03	0,00E+00	2,55E+00
Ecotoxicidad acuática	kg 1,4-DB eq	0,00E+00	3,65E+00	0,00E+00	0,00E+00
Average European (kg NOx eq)	kg NOx eq	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,55E+00
Oxidación fotoquímica	kg C2H4	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,89E-02
Máximo Incremento Ozono	kg formed O3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,15E-03

Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

Los resultados presentados en la tabla anterior dan a conocer que todas las categorías se ven impactadas directamente por el consumo de electricidad a excepción de la categoría

ecotoxicidad acuática (afectada por consumo de químicos usados en la limpieza de oficinas). Los resultados se pueden evidenciar de forma directa en la siguiente figura.

Figura 26. Caracterización global del Impacto Ambiental Potencial - Etapa de Distribución y Consumo de Agua



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

De la figura es importante destacar que todas las categorías tienen el mismo comportamiento y contribución ambiental (100%) dada al consumo de energía eléctrica a excepción de la categoría eutrofización que es afectada por los desinfectantes y desengrasantes utilizados en casinos (7%) y lavandería (9%) y energía (84%), como de la categoría de la ecotoxicidad humana que es influenciada por el uso de limpiadores, desengrasantes y demás en el área de oficinas en un 100% del impacto ambiental.

6.4.3. Análisis por Atributos para la etapa de Distribución y consumo. Como soporte al análisis de caracterización se presenta en la siguiente tabla el porcentaje de contribución de cada etapa de proceso frente a las categorías de estudio evaluadas. Según la interpretación de los resultados y como se mencionó en párrafos anteriores, las categorías de acidificación, agotamiento de recursos abióticos, el calentamiento global, la toxicidad humana, la emisión de NOx, la oxidación fotoquímica y la formación de ozono, se ven afectadas directamente por el consumo de energía eléctrica.

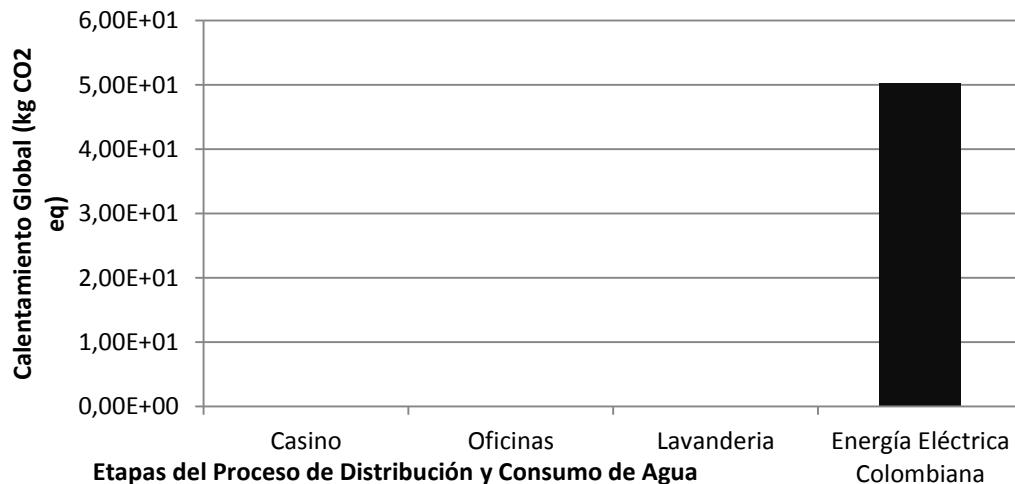
Tabla 23. Resultados de Análisis por Atributos de la etapa de Distribución y Consumo de Agua

Categoría de impacto	Unidad	Casino	Oficinas	Lavandería	Energía Eléctrica Colombiana
Acidificación	kg SO2 eq	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
Calentamiento Global	kg CO2 eq	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	0,00%	0,16%	0,00%	99,84%
Average European (kg NOx eq)	kg NOx eq	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
Ecotoxicidad acuática	kg 1,4-DB eq	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
Oxidación fotoquímica	kg C2H4	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
Máximo Incremento Ozono	kg formed O3	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
Eutrofización	kg PO4 eq	6,75%	0,00%	9,09%	84,17%

Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

En la siguiente figura se presenta el perfil medioambiental para la categoría de calentamiento global que refiere a las demás categorías con el respectivo comportamiento. El consumo de energía eléctrica conlleva al impacto ambiental potencial, directamente a las categorías mencionadas por la emisión de metano, óxidos de nitrógeno, dióxido y monóxido de carbono, así como de algunos hidrocarburos.

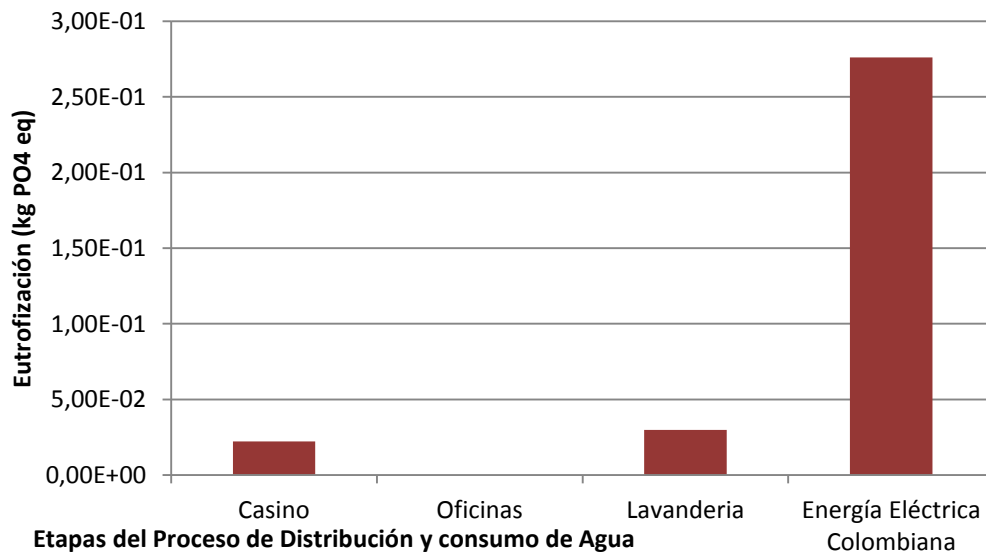
Figura 27. Perfil medioambiental para la categoría Calentamiento global- Etapa de Distribución y Consumo de Agua.



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

La categoría de Eutrofización se ve afectada por el consumo de etoxilato de alcohol, Alcohol etílico, amoniaco, peróxido de hidrogeno presentes en detergente de ropa, blanqueadores y desinfectantes; así como de los contaminantes presentes en el consumo de energía eléctrica.

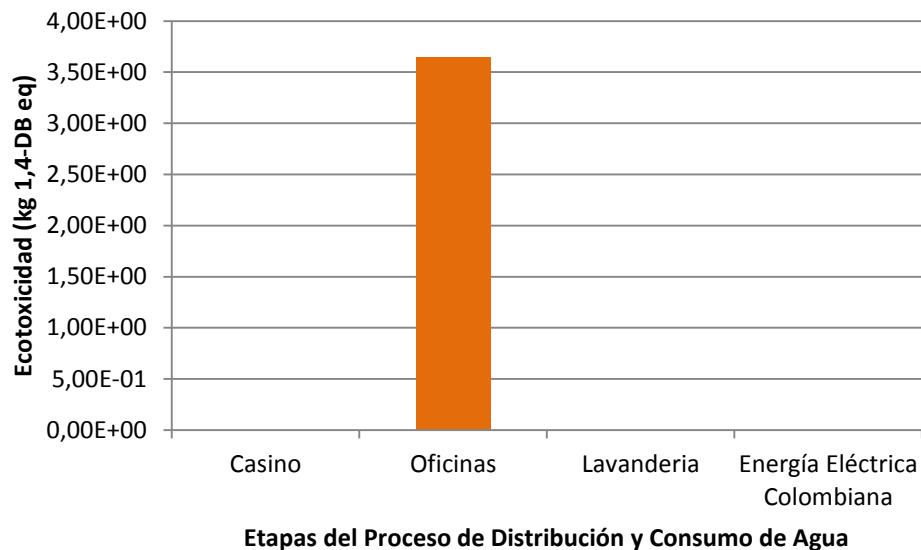
Figura 28. Perfil medioambiental para la categoría Eutrofización- Etapa de Distribución y Consumo de Agua.



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

En la siguiente figura se presenta el perfil medioambiental dado a la categoría de Ecotoxicidad por efectos del consumo de desengrasantes, ambientadores y desinfectantes utilizados en el área de oficinas los cuales contienen: éter de glicol, ftalatos, benzol, entre otros.

Figura 29. Perfil medioambiental para la categoría Ecotoxicidad Acuática- Etapa de Distribución y Consumo de Agua.



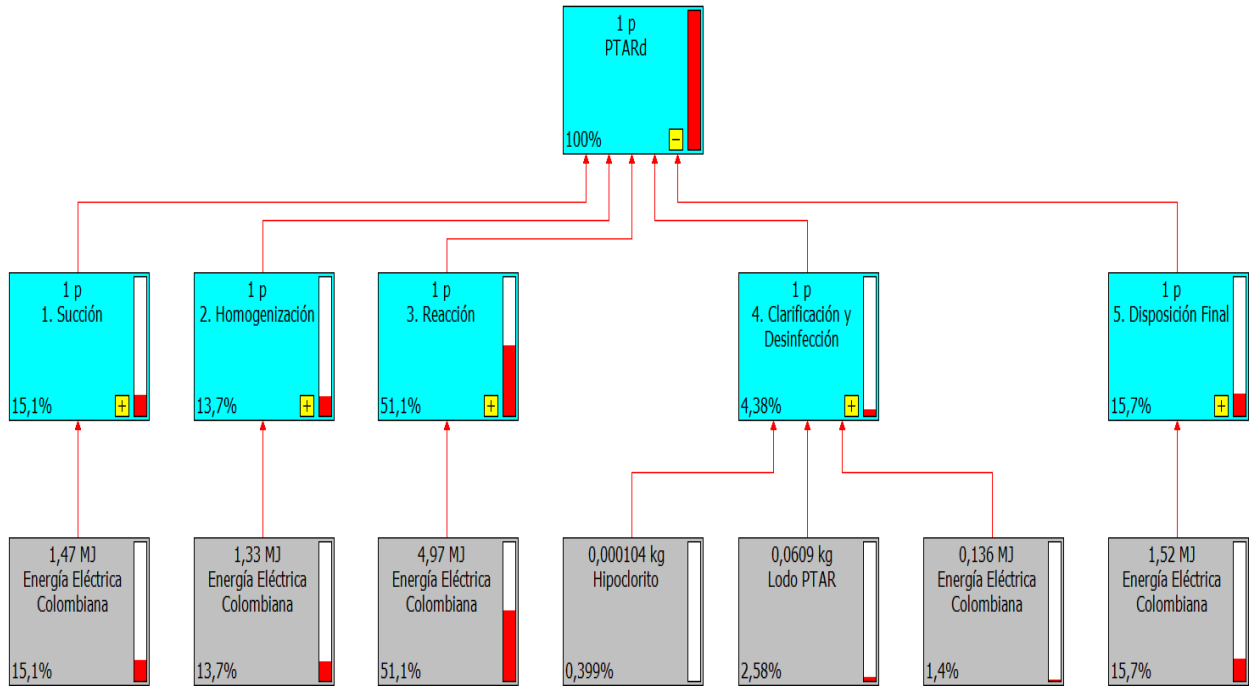
Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

6.5. Análisis de Impacto Ambiental potencial para la planta PTARd.

A continuación se presenta el análisis de impacto ambiental potencial realizado al proceso de depuración de 1 m³ de agua residual doméstica, incluyendo el impacto asociado por la generación de lodos. En la siguiente figura se presenta el árbol de procesos para las diferentes etapas de depuración (succión, homogenización, sistema de reacción, clarificación y desinfección, y disposición final del agua tratada) cajas de color magenta y la carga ambiental (cajas de color gris), atribuidas por el consumo de hipoclorito, generación de lodos y consumo de energía eléctrica para las diferentes actividades (bombeo, recirculación, dosificación, etc.).

6.5.1. Análisis de Contribución Ambiental para la planta PTARd. Este análisis presenta el porcentaje de contribución ambiental asociado a cada etapa de proceso de la planta de tratamiento de agua residual doméstica. De la figura es importante destacar la participación ambiental dada en el sistema de reacción (51,1%) asociado al consumo de energía eléctrica (mecanismo de aireación) y contenido de metales y microorganismos en el agua residual a tratar; seguido de la etapa de disposición final (15,7%) y sistema de succión (15,1%) debido al consumo de energía en los sistemas de bombeo.

Figura 30. Árbol de proceso de la Planta PTARd (corte de visualización del 0.005%).



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

De la figura también se observa que los procesos con menor contribución fueron la homogenización (13,7%) por consumo energético (sistema de mezclado) y la etapa de clarificación y desinfección (4.38%) asociado al mecanismo de aireación, contenido de metales en la generación de lodos y el consumo de hipoclorito para desinfectar el agua residual.

6.5.2. Análisis de Caracterización para la planta PTARd. En la siguiente tabla se aprecia la contribución asociada por la caracterización de cada etapa de estudio (succión, homogenización, sistema de reacción, clarificación y desinfección, y disposición final del agua tratada) de la planta PTARd, respecto a las categorías de evaluación definidas por el método CML 2001. De la tabla se puede deducir que las categorías con mayor contribución son la eutrofización, el calentamiento global y la toxicidad humana.

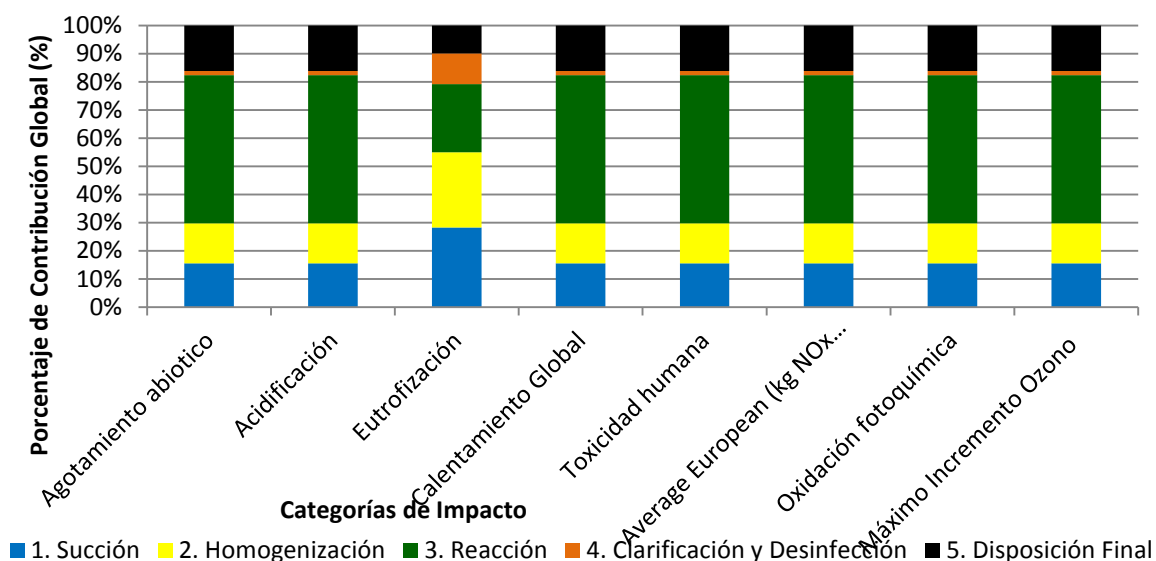
Tabla 24. Resultados de caracterización global de la Planta PTARd.

Categoría de impacto	Unidad	1. Succión	2. Homogenización	3. Reacción	4. Clarificación y Desinfección	5. Disposición Final	Total
Agotamiento abiotico	kg Sb eq	0,0003	0,0003	0,0011	0,0000	0,0003	0,0022
Acidificación	kg SO2 eq	0,0116	0,0105	0,0392	0,0011	0,0120	0,0745
Eutrofización	kg PO4 eq	32,2961	30,6813	27,6175	12,5248	11,2761	114,3959
Calentamiento Global	kg CO2 eq	0,3060	0,2777	1,0346	0,0283	0,3174	1,9640
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	0,0155	0,0141	0,0525	0,0014	0,0161	0,0996
Average European (kg NOx eq)	kg NOx eq	0,0155	0,0141	0,0525	0,0014	0,0161	0,0996
Oxidación fotoquímica	kg C2H4	0,0002	0,0002	0,0008	0,0000	0,0002	0,0015
Máximo Incremento Ozono	kg formed O3	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0002

Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

En la siguiente figura se evidencia el impacto global asociado a cada categoría por las diferentes etapas del proceso de depuración, de la cual se puede observar que las categorías agotamiento abiótico, acidificación, calentamiento global, toxicidad humana, emisión de NOx, oxidación fotoquímica e incremento de ozono presentan el mismo comportamiento respecto a las etapas del proceso objeto de estudio, con mayor contribución el sistema de succión (16%) y sistema de reacción (53%), mientras que en la eutrofización fue 28% y 24% respectivamente.

Figura 31. Caracterización global del Impacto Ambiental Potencial – Planta PTARd.



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

6.5.3. Análisis por Atributos para la planta PTARd. En la siguiente tabla se puede apreciar el porcentaje de contribución de cada etapa de proceso frente a las categorías de estudio evaluadas. Como se mencionó en la caracterización de impactos las categorías agotamiento abiótico, acidificación, calentamiento global, toxicidad humana, emisión de NOx, oxidación fotoquímica e incremento de ozono, presentan el mismo porcentaje de contribución para las diferentes etapas de proceso como son: reacción (52,68%); disposición final (16,16%), sistema de succión (15,58%), homogenización (14,14%) y la etapa de clarificación y desinfección una contribución del 1,44%, tal como se presenta en la siguiente tabla de resultados por atributos.

Tabla 25. Resultados de Análisis por Atributos de la Planta PTARd.

Categoría de impacto	Unidad	1. Succión	2. Homogenización	3. Reacción	4. Clarificación y Desinfección	5. Disposición Final
Acidificación	kg SO2 eq	15,58%	14,14%	52,68%	1,44%	16,16%
Agotamiento abiotico	kg Sb eq	15,58%	14,14%	52,68%	1,44%	16,16%
Calentamiento Global	kg CO2 eq	15,58%	14,14%	52,68%	1,44%	16,16%
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	15,58%	14,14%	52,68%	1,44%	16,16%
Average European (kg NOx eq)	kg NOx eq	15,58%	14,14%	52,68%	1,44%	16,16%
Oxidación fotoquímica	kg C2H4	15,58%	14,14%	52,68%	1,44%	16,16%

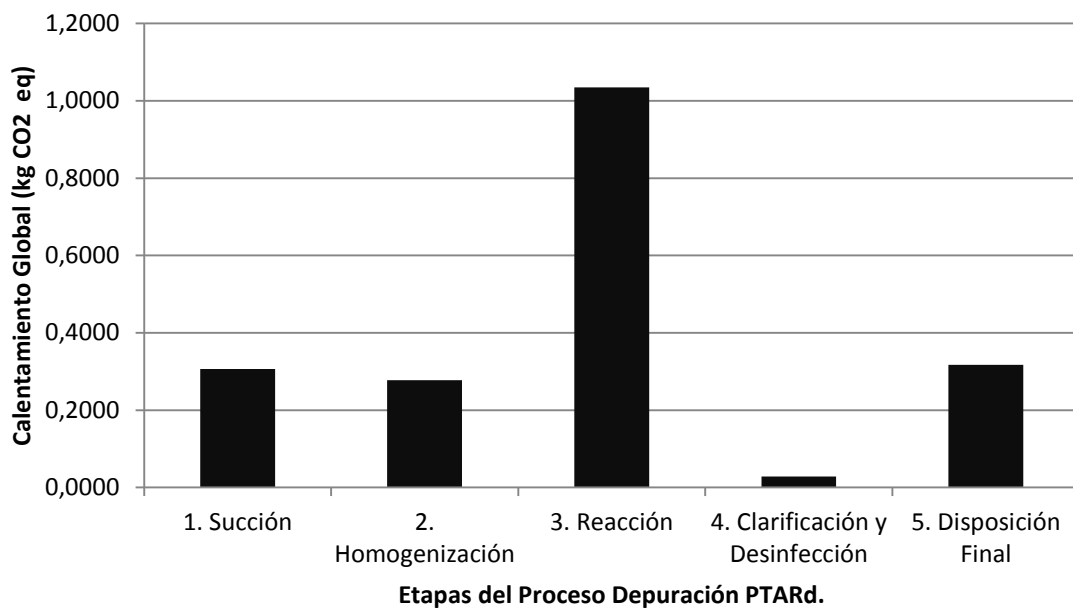
Máximo Incremento Ozono	kg formed O3	15,58%	14,14%	52,68%	1,44%	16,16%
Eutrofización	kg PO4 eq	28,23%	26,82%	24,14%	10,95%	9,86%

Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.O4.

Respecto a los resultados presentados en la tabla anterior, se procedió a ilustrar gráficamente los impactos asociados a cada categoría según la etapa de proceso, tal como se ha explicado en los procesos anteriores. En el caso del calentamiento global, se presenta en la Figura 32 el perfil medio ambiental, en donde se ve claramente el comportamiento mencionado en los resultados del análisis por atributos, mayor contribución en el sistema de reacción y disposición final para el tratamiento de 1 m³ de agua residual doméstica. Este impacto está asociado directamente por el consumo de energía eléctrica, quien es la encargada de emitir contaminantes al aire por su consumo, tales como: metano, monóxido y dióxido de carbono, algunos hidrocarburos y material particulado entre otros. El comportamiento de este perfil es el mismo para las categorías ya mencionadas, por ende, no fue necesario hacer réplica del mismo análisis.

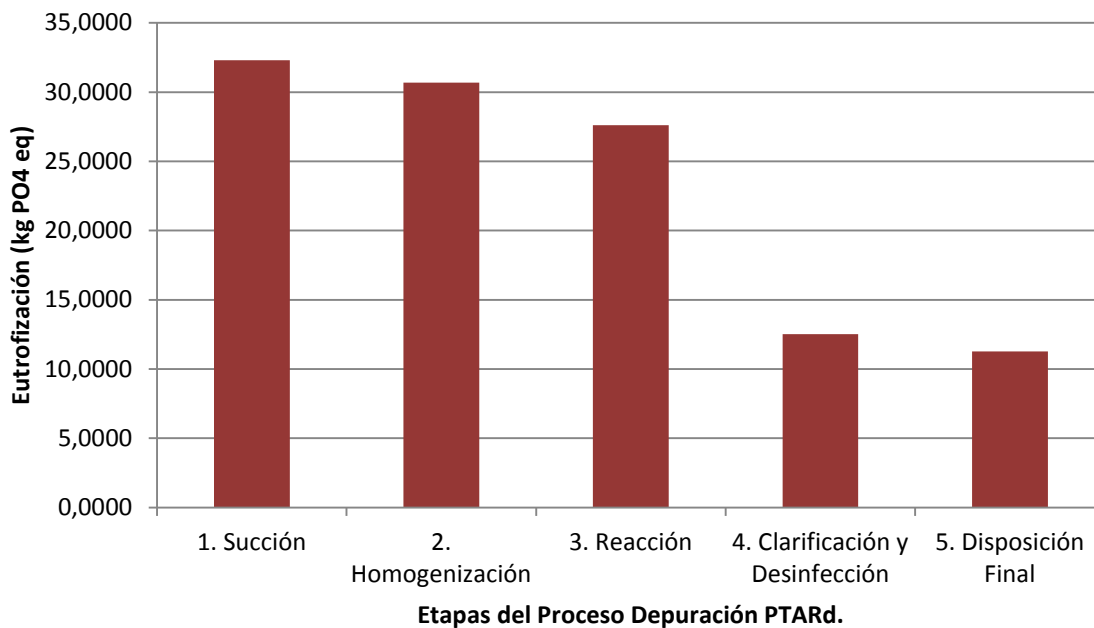
En la **Figura 33** se ilustra el perfil medioambiental para la categoría eutrofización afectada por la presencia de fósforo (fosfatos, ortofosfatos, etc.) en el agua residual a tratar y la presencia de óxidos de nitrógeno y azufre en relación al consumo de energía eléctrica, para cada etapa de proceso, siendo mayor el impacto para las etapas en donde inicia el tratamiento (succión 28,23%; homogenización 26,82%, reacción 24,14%; clarificación 10,95% y disposición 9,86%).

Figura 32. Perfil medioambiental para la categoría Calentamiento global- Planta PTARd.



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

Figura 33. Perfil medioambiental para la categoría Eutrofización- Etapa de Distribución y Consumo de Agua.



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

6.6. Análisis de Impacto Ambiental potencial para el Ciclo Integral del Agua del Campamento El Cedral.

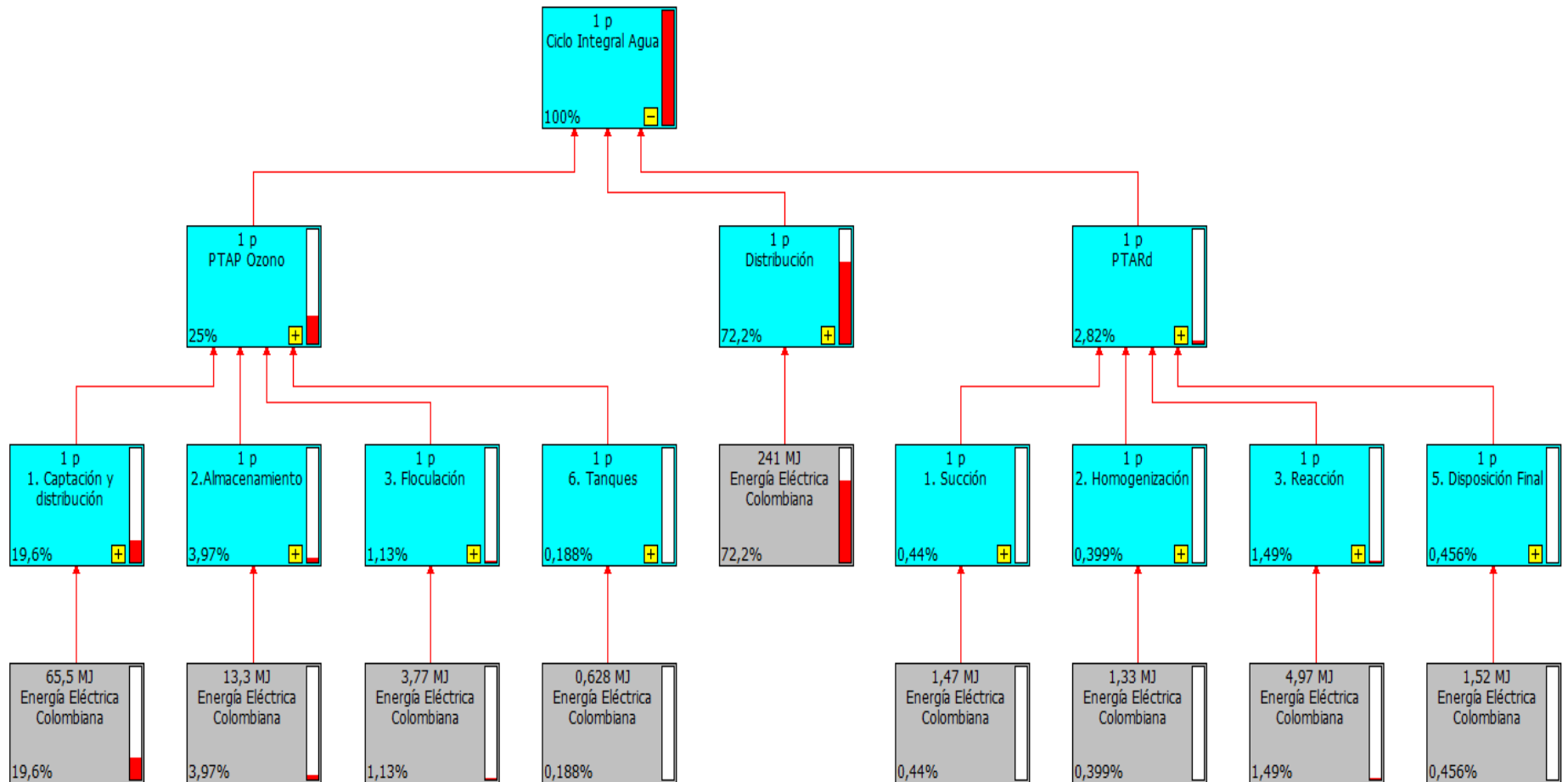
Como análisis final del estudio se procedió a realizar la interpretación del impacto ambiental potencial para el ciclo integral del agua, utilizando en el tratamiento de agua potable el ozono como agente oxidante, pues este escenario es el utilizado actualmente, seguido del sistema de distribución y consumo de 1 m³ de agua y el tratamiento de 1m³ de agua residual doméstica.

6.6.1. Análisis de Contribución Ambiental para el Ciclo Integral del Agua. Como todos los análisis previos, se inicia la interpretación de resultados con la contribución ambiental global del ciclo integral por medio de la Figura 34, que presenta el árbol de procesos donde se evidencia que el proceso que mayor impacto genera es la distribución y consumo del agua al interior del campamento (72,2%), originado por el consumo energético en las respectivas áreas (oficina, casino, alojamiento, lavanderías, etc.) y el uso de químicos aunque este no sea significativo al momento de globalizar el impacto.

El siguiente proceso de mayor contribución es la planta de tratamiento de agua potable (25%), referido al consumo de energía en las etapas de captación y conducción del agua hacia el almacenamiento previo, los sistemas de recirculación y sistemas de dosificación de químicos como de los mecanismos de agitación, sin olvidar la presencia de metales y contaminantes en las aguas a tratar como de la generación de lodos, efectos que no se visualizan en la figura por ser considerados de menor contribución al proceso.

Finalmente el proceso de menor contribución fue la planta de depuración de aguas residuales domésticas (2,82%), pues su afectación está dada al consumo de energía eléctrica, que aunque es mínima comparada a los otros procesos, su aporte es de importancia para el estudio, pues se puede lograr disminuir su contribución con la implementación de alternativas de re-uso de agua, objetivo adicional del estudio.

Figura 34. Árbol de proceso del Ciclo Integral del Agua – Campamento El Cedral (corte de visualización del 0.0005%).



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.O4.

6.6.2. Análisis de Caracterización para el Ciclo Integral del Agua. Como complemento del análisis anterior, se presenta en la siguiente tabla los resultados de la caracterización global del ciclo integral del agua, según el alcance definido por el estudio. En la tabla se logra apreciar que las categorías con mayor influencia, si se normalizaran los valores, independiente de la unidad de la categoría, sería la eutrofización en primer lugar (59%), seguido del calentamiento global (35%) y de la ecotoxicidad acuática (1,9%).

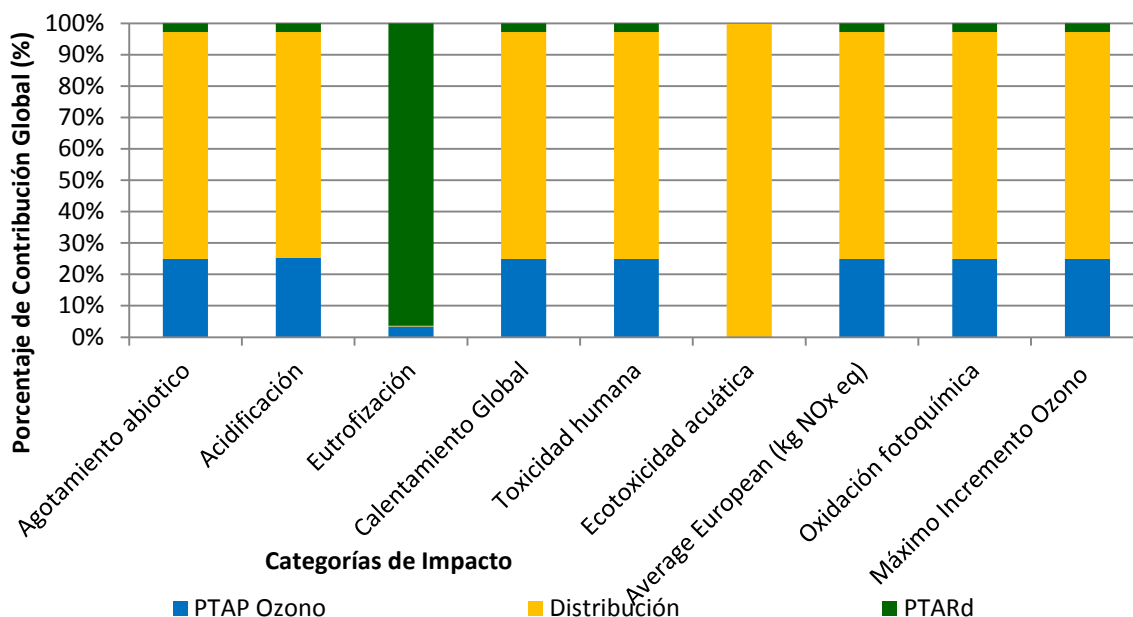
Tabla 26. Resultados de caracterización global del Ciclo Integral del Agua del Campamento el Cedral.

Categoría de impacto	Unidad	PTAP Ozono	Distribución	PTARd	Total
Agotamiento abiotico	kg Sb eq	1,91E-02	5,52E-02	2,16E-03	7,64E-02
Acidificación	kg SO2 eq	6,67E-01	1,91E+00	7,45E-02	2,65E+00
Eutrofización	kg PO4 eq	4,03E+00	3,28E-01	1,14E+02	1,19E+02
Calentamiento Global	kg CO2 eq	1,74E+01	5,02E+01	1,96E+00	6,96E+01
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	8,81E-01	2,55E+00	9,96E-02	3,53E+00
Ecotoxicidad acuática	kg 1,4-DB eq	6,59E-06	3,65E+00	8,96E-06	3,65E+00
Average European (kg NOx eq)	kg NOx eq	8,81E-01	2,55E+00	9,96E-02	3,53E+00
Oxidación fotoquímica	kg C2H4	1,35E-02	3,89E-02	1,52E-03	5,39E-02
Máximo Incremento Ozono	kg formed O3	1,78E-03	5,15E-03	2,01E-04	7,14E-03

Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

Siguiendo con el análisis, se procedió a graficar en la **Figura 35** la interacción del impacto generado por cada proceso a las diferentes categorías, encontrando que todas las categorías (agotamiento abiótico, acidificación, calentamiento global, toxicidad humana, emisión de óxidos de nitrógeno, oxidación fotoquímica e incremento de ozono) presentan la misma caracterización pues están relacionadas a las emisiones generadas por el consumo de energía eléctrica, a diferencia de la categorías de eutrofización y ecotoxicidad acuática que son impactadas por los contenidos de metales y contaminantes presentes en el agua residual tratada y los químicos utilizados en las áreas internas del campamento, respectivamente.

Figura 35. Caracterización global del Impacto Ambiental Potencial del Ciclo Integral del Agua del Campamento el Cedral.



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

6.6.3. Análisis por Atributos del Ciclo Integral del Agua. Finalmente se presenta la explicación del análisis por atributos para las categorías de mayor influencia, tal como se presenta en la siguiente tabla de atributos por categoría y proceso.

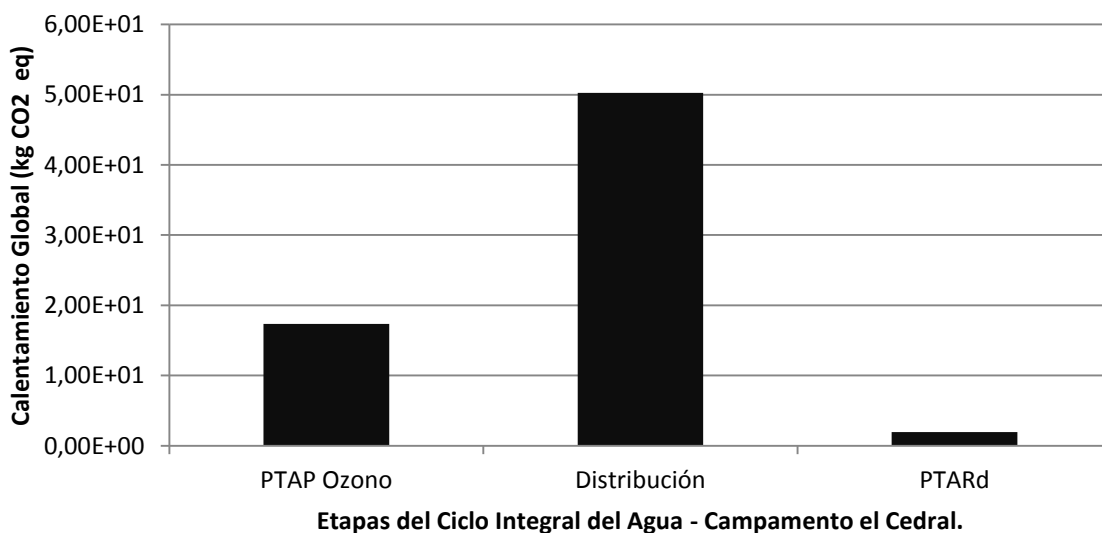
Tabla 27. Resultados de Análisis por Atributos del Ciclo Integral del Agua del Campamento el Cedral.

Categoría de impacto	Unidad	PTAP Ozono	Distribución	PTARd
Acidificación	kg SO2 eq	25,19%	72,00%	2,81%
Agotamiento abiotico	kg Sb eq	24,96%	72,22%	2,82%
Calentamiento Global	kg CO2 eq	24,96%	72,22%	2,82%
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	24,93%	72,25%	2,82%
Average European (kg NOx eq)	kg NOx eq	24,96%	72,22%	2,82%
Ecotoxicidad acuática	kg 1,4-DB eq	0,00%	100,00%	0,00%
Oxidación fotoquímica	kg C2H4	24,96%	72,22%	2,82%
Máximo Incremento Ozono	kg formed O3	24,96%	72,22%	2,82%
Eutrofización	kg PO4 eq	3,39%	0,28%	96,33%

Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

Con base en los resultados mencionados en la tabla anterior, se ilustran en las siguientes figuras las tendencias de los perfiles medioambientales para las distintas categorías. En el caso del Calentamiento Global y como se explicó en análisis anteriores, esta se vio afectada básicamente por los contaminantes emitidos a la atmósfera cuando se genera este tipo de energía hidroeléctrica y luego es utilizada en diferentes procesos. Impactos que no sólo afectan esta categoría sino las que ya fueron nombradas que tienen el mismo perfil medioambiental.

Figura 36. Perfil medioambiental para la categoría Calentamiento global- Ciclo Integral del Agua.

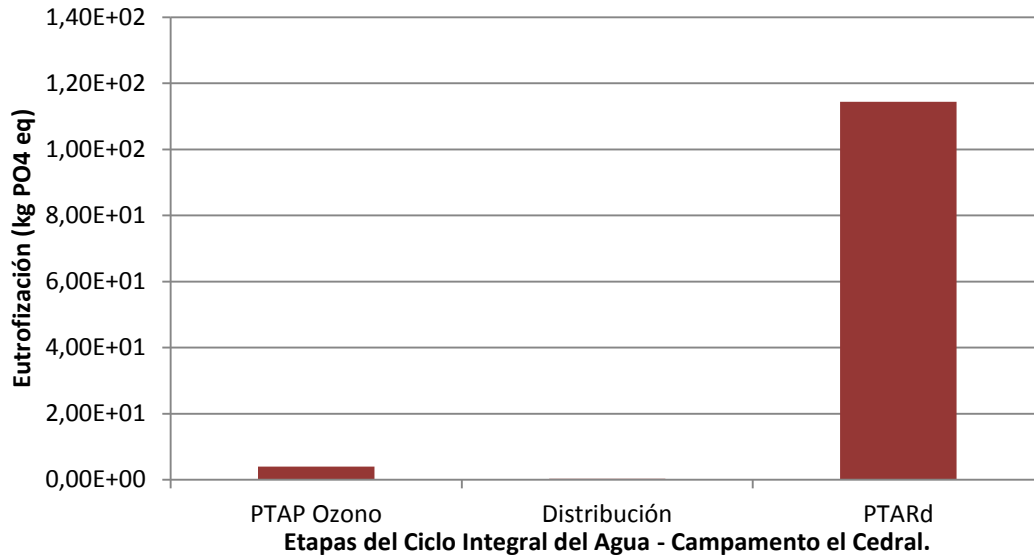


Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

Como se logra observar en la figura anterior, a mayor consumo de energía eléctrica (proceso de distribución 72% contribución) mayor impacto ambiental potencial para las categorías resaltadas.

En el caso del perfil medioambiental de la categoría eutrofización que se ilustra en la **Figura 37**, esta se vio afectada por la presencia de fósforo (fosfatos, ortofosfatos, etc.) en el agua residual a tratar (96% planta PTARd), la presencia de óxidos de nitrógeno y azufre en relación al consumo de energía eléctrica (todos los procesos) y al contenido de fósforo y metales en el agua a ser potabilizada (3,39% planta PTAP).

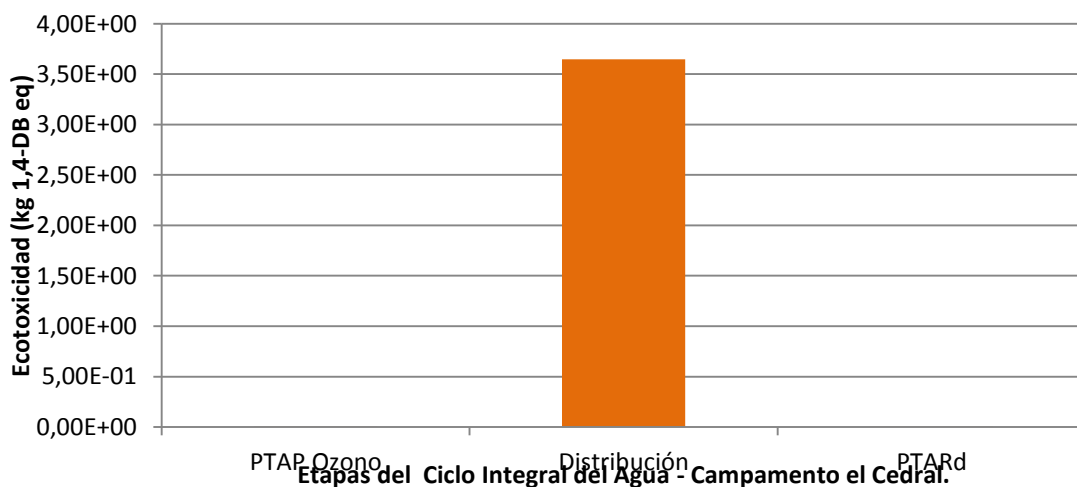
Figura 37. Perfil medioambiental para la categoría Eutrofización- Ciclo Integral del Agua.



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

El perfil medioambiental de la categoría de Ecotoxicidad es influenciada por los impactos ambientales generados en el consumo de desengrasantes, ambientadores y desinfectantes utilizados en el área de oficinas los cuales contienen: éter de glicol, ftalatos, benzol, entre otros compuestos químicos (99,99% Proceso de Distribución) y en menor contribución los químicos usados en las plantas PTAP y PTAR, que se consideraron despreciables en la comparación.

Figura 38. Perfil medioambiental para la categoría Ecotoxicidad- Ciclo Integral del Agua.



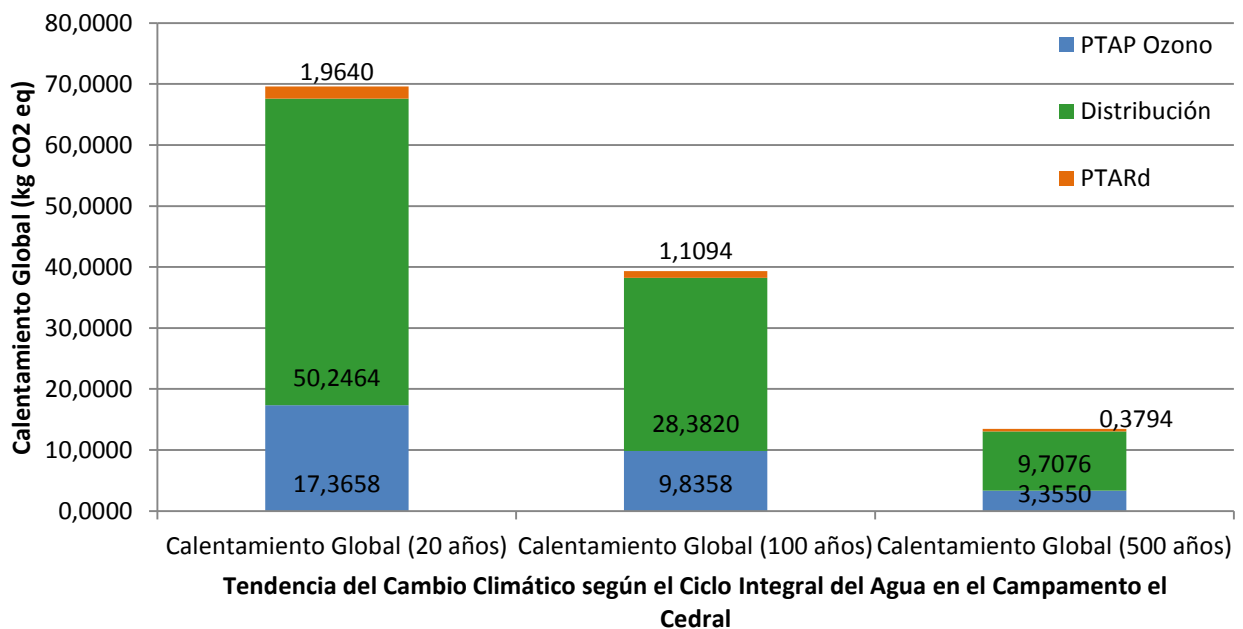
Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

6.7. Análisis Adicional del Poder de Calentamiento Global.

Con relación a los resultados ya expuestos y al encontrar la afectación existente al consumir energía eléctrica de procedencia hidroeléctrica y su impacto a la categoría de calentamiento global, se optó por realizar un análisis a priori del comportamiento de dicho impacto a lo largo del tiempo. Para ello, el método CML 2001 de estudio permite evaluar la tendencia de la categoría en tres periodos de tiempo (20 años, 100 años y 500 años) para los tres procesos que conforman el ciclo integral de 1 m³ de agua.

En la siguiente figura se presenta el perfil medioambiental del calentamiento global y su tendencia en diferentes años. La contribución ambiental de la categoría, esta originada principalmente por el consumo de energía eléctrica proveniente de una central hidroeléctrica como se explicó en párrafos anteriores. En el caso del proceso de distribución, este contribuye en un 72% del impacto, seguido de la Planta PTAP en un 25% y finalmente de la planta PTARd en un 3%, en relación al consumo de energía.

Figura 39. Perfil medioambiental del Poder de calentamiento global- Ciclo Integral del Agua.



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

De la figura se puede interpretar que con el paso del tiempo, por ejemplo de 20 a 100 años, el impacto disminuye en un 57% aproximadamente, comparado a la disminución existente entre

100 años y 500 años que es del 34%. Esta reducción es considerable y depende del tiempo de permanencia de los gases de efecto de invernadero (metano, dióxido de carbono, NOx, etc.) que se encuentren en la atmósfera, ya que cada contaminante tiene un factor de emisión (índice GWP) para cada tiempo de evaluación (por ejemplo para el metano el índice según el tiempo a evaluar son: 72 (20 años); 25 (100 años); y 7.6 (500 años)).

6.8. Tecnología de tratamiento para el reúso del agua.

El tratamiento de agua residual permite remover parte de los contaminantes presentes en la misma y con la ayuda de técnicas biológicas logra disminuir la cantidad de agentes patógenos, el nivel de sólidos suspendidos y la turbidez, que de no ser así, se espera que el cuerpo receptor pueda finalizar el respectivo proceso (ORTIZ, et al., 2007). Durante las últimas décadas se ha empleado el cloro como agente para la desinfección del agua con el fin obtener un agua servida de calidad mínima exigida para su uso, dando cumplimiento con la normativa ambiental. Sin embargo, es importante enunciar que el cloro reacciona con compuestos orgánicos presentes en el agua que terminado formando compuestos organoclorados y trihalometanos, los cuales tienen efectos mutagénicos y carcinogénicos a la salud humana (Fernández García, 2013).

Por lo anterior, surge la necesidad de implementar tratamientos alternos que permitan complementar el sistema de depuración y desinfección del agua residual, para luego dar un re-uso a las mismas. Las tecnologías pueden incluir tratamientos químicos, físicos, biológicos o combinaciones de los mismos, dependiendo del efluente a tratar y de la necesidad requerida en la reutilización del agua. La reutilización de efluentes depurados es un componente intrínseco del ciclo natural del agua. Mediante el vertido de efluentes a los cursos de agua y su dilución con el caudal circulante, las aguas residuales han venido siendo reutilizadas en puntos aguas abajo, para su aprovechamiento urbano, agrícola (uso más frecuente es la irrigación de hortalizas.) e industrial. (PEREZ PARRA, 2013) (ORTA DE VELÁSQUEZ, 2002).

Las tecnologías usadas para el re-uso de agua residual, son técnicas derivadas de los tratamientos implementados en la depuración de aguas residuales que ofrecen grandes posibilidades de innovación, debido al valor económico que el agua residual regenerada tiene como recurso hídrico alternativo. En la elección de las tecnologías de regeneración (tratamiento avanzado) para agua residual suelen preferirse aquellas que no emplean mucha energía. Esto se justifica por el hecho de que el agua residual suele emplearse para riego u otros usos relativamente poco “nobles”. (CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO - CYTED, 2014).

Actualmente, se utilizan sistemas de depuración con tratamientos secundarios de Alta Tecnología, como los que incluyen sistemas biológicos, quienes obtienen aguas tratadas para su reutilización en distintos usos, eliminando en su proceso de depuración Bacterias, Virus, Nematodos, Legionella y Escherichia Coli (GONZALEZ CABRERA, et al., 2014). Algunos autores clasifican los tratamientos de acuerdo al contaminante a tratar: materia en suspensión, materia coloidal o materia disuelta (L J, 2010). En donde la materia en suspensión se puede eliminar bajo procesos de desbaste, sedimentación, filtración, flotación, y Coagulación-Floculación. La materia disuelta por precipitación, procesos electroquímicos, intercambio iónico, adsorción, y desinfección (FUNDACIÓN CHILE, 2012).

Dentro de las tecnologías más importantes según el estudio de patentes realizado por Gonzales Cabrera y otros (2014), se presenta en la siguiente tabla las principales tecnologías (patentes con sus respectivos códigos) y el número de documentos (más de 1200 estudios en relación a las diferentes tecnologías) referenciados con las patentes de estudio.

Tabla 28. Tecnología para el tratamiento de aguas residuales.

*Código	Tecnología para el tratamiento de aguas residuales	N° Documentos
C02F1/44	Diálisis ósmosis o ósmosis inversa	287
C02F1/52	Floculación o precipitación de las impurezas en suspensión	248
C02F1/28	Absorción o adsorción	248
C02F1/32	Irradiación por luz ultravioleta	158
C02F1/50	Adición o empleo de un germicida o por tratamiento oligodinámico.	148
C02F1/78	Oxidación por medio de ozono	145

Fuente: GONZALEZ CABRERA Odonel [et al.] Estudio de patentes sobre tecnologías para tratamiento de agua y el agua residual. [Journal]. - Campinas, Brasil : Scielo. TransInformação., 2014. - 3 : Vol. 26.

De las tecnologías presentadas en la tabla anterior, las de mayor desarrollo e implementación para la regeneración y reutilización de aguas residuales tratadas, son el tratamiento a través de membranas, resinas de intercambio iónico y la oxidación con ozono. Con esta información, fue necesario establecer la definición, ventajas, desventajas y usos, como se da a conocer en la Tabla 29.

Tabla 29. Tecnología para el tratamiento de aguas residuales.

Tecnología	Definición	Uso	Ventaja	Desventaja
Resinas de Intercambio Iónico	Se basa en un proceso de adsorción, en flujo continuo, en columnas con material de intercambio específico. El efluente a tratar es bombeado a través de la columna donde los elementos son retenidos, al saturarse la columna se inicia el proceso de regeneración. Permiten la filtración continua del material logrando recuperar los mismos. Requiere del proceso de neutralización y remoción de sólidos.	Vertidos de industria galvanotécnica, nuclear, agroindustria, acuicultura, recuperación de valores metálicos, minería.	Es altamente selectiva y capaz de remover la totalidad del analito, sobre el 99,9%. Posee elevada innovación, de operación simple, utiliza espacios pequeños. No genera lodos y produce bajos volúmenes de efluídos.	Posee costos operacionales mensuales por consumo de reactivos químicos (insumos constantes) y uso de regenerantes. Genera flúidos que requieren tratamientos posteriores.
Oxidación Parcial o completa	Implica la generación suficiente de radicales hidroxilos que interactúan con los compuestos orgánicos del medio. Familia de métodos que utilizan la elevada capacidad oxidante de los radicales HO· y que se diferencian entre sí en la forma en la que los generan.	Aplicada para residuos químicos, PTAP, PTAR, agua de piscinas, industria farmacéutica y alimenticia.	Ayuda a la biodegradabilidad y eliminación de contaminantes en concentraciones de 5g/L	Baja selectividad. Los reactivos que se emplean son costosos
Membranas	Barreras físicas semipermeables que separan dos fases, impidiendo su íntimo contacto y restringiendo el movimiento de las moléculas a través de ella de forma selectiva. Se clasifican de acuerdo a la diferencia de presión (micro, ultra y nanofiltración; osmosis inversa) y a la diferencia de potencial eléctrico (electrodialísis).	Industrias de alimentos, láctea, farmacéutica y de componentes electrónicos;	Permite la separación de contaminantes que se encuentran disueltos o dispersos en forma coloidal; eliminando contaminantes de baja concentración. Operación a baja temperatura. Proceso sencillo, diseño poco espacio y combinatorio con otros tratamientos.	Costos de implementación y operación demasiado altos y mas si se requiere tratar grandes caudales. No elimina contaminantes, solo lo concentra en otra fase. Puede existir incompatibilidad entre la membrana y el contaminante. Deficiente escalado.

Fuente: GONZALEZ CABRERA Odonel [et al.] Estudio de patentes sobre tecnologías para tratamiento de agua y el agua residual. [Journal]. - Campinas, Brasil : Scielo. TransInformação., 2014. - 3 : Vol. 26.

A continuación se explica con más detalle las tecnologías más aplicadas por autores.

- *Ozonización*

El empleo de ozono es una alternativa segura y eficaz en el tratamiento de aguas. En este sentido se ha incrementado su uso en las últimas décadas, dado su alto poder oxidante y su elevado efecto germicida de amplio espectro contra bacterias, hongos, virus y quistes de parásitos producción de ozonizadores más compactos y eficientes. En la siguiente tabla se presentan las diferentes técnicas de ozonización:

Tabla 30. Técnicas de Tratamiento según la tecnología de ozonización.

Tipos Ozonización	Definición	Ventajas	Desventajas
Medio Alcalino	La oxidación de los compuestos orgánicos contenidos en el efluente, se produce por la combinación de dos mecanismos: la vía directa que representa la reacción entre la molécula orgánica y el ozono disuelto, y la vía indirecta, mediante la cual los radicales hidroxilo actúan como oxidantes.	Tecnología de reactor gas-líquido, conocido. Flexibilidad para tratar distintos caudales y concentraciones Fácilmente automatizable	Baja solubilidad del ozono en agua. Presencia de carbonatos, bicarbonatos y otros neutralizantes. Posible formación de bromatos
Peróxido de Hidrógeno	La adición de peróxido de hidrógeno combinado con el ozono provoca la iniciación de un ciclo de descomposición que resulta en la formación de un mol de radicales hidroxilo por cada mol de ozono que se descompone. Se basa principalmente en la degradación indirecta por vía radicalaria.	Eficacia y velocidad de degradación elevadas. Degrada totalmente los compuestos Tecnología conocida y fácil de automatizar	Alto costo por la generación de ozono y el consumo del peróxido de hidrogeno.
Ozono –Ultravioleta	Degradación de contaminantes orgánicos siempre que éstos absorban dicha radiación y lo hagan con una especificidad razonable en comparación con otros compuestos presentes en el medio.	Velocidad de oxidación alta Reducción del costo de reactivos	El costo de la radiación UV es alto La eficacia de la radiación es baja La economía del proceso requiere que el compuesto a degradar absorba la UV
Peróxido de Hidrógeno y Catalizador	Sistema catalítico homogéneo en el cual una sal de hierro, habitualmente FeSO ₄ , genera radicales gracias a la interacción del peróxido de hidrógeno con la forma reducida, Fe(II). La concentración de hierro limita la velocidad de oxidación.	Método aprobado y con amplio desarrollo industrial. Eficaz como pretratamiento	Debe utilizar un catalizador homogéneo Se generan lodos de FeOH. Se debe controlar el pH del medio.
Electroquímicos	Se basan en la utilización de energía eléctrica para romper los enlaces de las moléculas. Los electrones se transfieren al compuesto orgánico mediante la intervención de radicales hidroxilo.	Mejoran la eficacia del proceso Evitan o reducen la necesidad de reactivos	Duración de los electrodos Costo elevado por alto consumo de energía
Ozonización catalítica	La actividad catalítica está directamente relacionada con la capacidad de descomposición de ozono disuelto y la consiguiente generación de radicales hidroxilo.	Facilidad de separación de productos Diseño de reactores bien conocido Nuevos materiales catalíticos en desarrollo	Baja solubilidad del ozono, que debe transferirse desde el gas Limitaciones a la transferencia de materia en un sistema trifásico

Fuente: Fuente: GONZALEZ CABRERA Odonel [et al.] Estudio de patentes sobre tecnologías para tratamiento de agua y el agua residual. [Journal]. - Campinas, Brasil : Scielo. TransInformação., 2014. - 3 : Vol. 26.

El uso del ozono en la desinfección de agua residual tratada, según los resultados presentados por ORTA DE VELÁSQUEZ (2002) indicaron un claro efecto desinfectante del ozono para eliminar bacterias patógenas resistentes como *V. cholerae* O1 fenotipo rugoso, además de bacterias indicadoras de contaminación (coliformes fecales) detectadas en el agua residual. La ozonación como tecnología alternativa permite vislumbrar una mejor opción, ante la utilización del cloro, ya que el ozono puede garantizar una calidad microbiológica adecuada de aguas tratadas que se destinan al re-uso. Un estudio adicional fue realizado por Muñoz Ortiz et al (2009) quienes evaluaron la efectividad de la utilización del ozono sólo y en combinación con el peróxido de hidrógeno y luego del pertinente análisis, logró concluir que las aguas residuales

tratadas con ozono o en combinación, disminuyen significativamente los niveles de toxicidad comparado con los otros tratamientos (filtración con arena y ósmosis inversa).

- *Membranas*

Estas tecnologías se pueden agrupar atendiendo a la fuerza impulsora responsable del flujo de permeado como se presenta en la siguiente tabla. La naturaleza de la membrana modifica las velocidades de paso de las sustancias disueltas en el agua, a través de ella, consiguiendo de esta forma un flujo de permeado con una concentración de contaminantes que cumpla las normativas del uso que se le pretenda dar y, en el caso de la filtración tangencial, un flujo de retenido con una alta concentración de contaminantes que será necesario tratar antes de su vertido. (RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, et al., 2006)

Tabla 31. Técnicas de Tratamiento según la tecnología de Membranas.

Membranas	Definición	Ventajas	Desventajas
Microfiltración	Actúan como tamices moleculares. La relación tamaño de sustancias contaminantes/distribución de tamaño de poros permite la exclusión de contaminantes en el permeado. Así, las sustancias mayores que el mayor tamaño de los poros serán totalmente rechazadas por la membrana, y las sustancias cuyo tamaño esté comprendido entre el mayor y menor tamaño de poros serán parcialmente rechazadas.	Utiliza valores de diferencia de presión transmembrana comprendidos en el intervalo 100 - 500 kPa, separar tamaños de partículas dentro del rango: 0.1 mm – 10 mm, Efluentes con baja y alta concentración de partículas.	Tiene lugar en el caso de dispersiones coloidales y soluciones. Altos costos de operación (reemplazar la membrana).
Ultrafiltración	La ultrafiltración utiliza diferencias de presión transmembrana de 100 - 800 kPa, con un intervalo de tamaño de poro de 10 Å – 1000 Å, pudiendo realizar separaciones de microsolutos como coloides y macromoléculas. Reducción coste por consumo de agua de la red municipal de abastecimiento: 0.25-0.5 US\$/m ³ agua reutilizada. Tiempo de vida útil: de 2/3 años	La ultrafiltración utiliza diferencias de presión transmembrana de 100 - 800 kPa, con un intervalo de tamaño de poro de 10 Å – 1000 Å, pudiendo realizar separaciones de microsolutos como coloides y macromoléculas. Reducción coste por consumo de agua de la red municipal de abastecimiento: 0.25-0.5 US\$/m ³ agua reutilizada. Tiempo de vida útil: de 2/3 años	Costos de capital y de operación demasiado altos para ser aplicados en tratamiento de grandes caudales. Oscilan entre 0.5 – 1.25 US\$/L/día y 0.75 – 1 US\$/L/día. Efluentes de aguas residuales de 2.5 – 25 m ³ /día
Ósmosis Inversa	Consiste en generar, mediante una membrana permeable al agua, una solución acuosa con bajo contenido en sal a partir de otra con alto contenido en sal. El proceso de separación se debe a las diferentes solubilidad y difusividad en la membrana de los componentes de la solución acuosa.	Los valores de operación de la diferencia de presión transmembrana y concentración de la solución son 7 – 70 bar y 200 – 30000 ppm, respectiva. La recuperación de componentes que vuelven a reciclarse en producción	El ensuciamiento es la causa más importante del mal funcionamiento de las membranas. Altos costes de operación debido a los problemas de ensuciamiento.

Membranas	Definición	Ventajas	Desventajas
Nanofiltración	Utiliza membranas con valores de pesos moleculares de corte de 200 D – 1000 D y coeficientes de rechazo de cloruro sódico de 0.2 – 0.80 %. NF se aplica para el tratamiento de aguas con una concentración salina de 200 mg/L – 5000 mg/L con presiones de trabajo de 7 bar – 14 bar, de ahí que también se denomine ósmosis inversa de baja presión.	Se utiliza en el tratamiento de aguas de consumo en pequeñas comunidades Eliminación de la dureza del agua y como pretratamiento para la obtención de agua ultrapura. Resulta evidente que las calidades del agua obtenida son suficientes para poder ser reutilizadas.	Para que estos procesos sean competitivos y tengan una mayor presencia en el tratamiento de aguas urbanas e industriales, será necesario un mayor desarrollo del sector con el fin de fabricar membranas más baratas, que permitan menores presiones de trabajo y reduzcan los problemas de ensuciamiento.
Electrodiálisis	Utilizan membranas donde se han incorporado grupos con cargas eléctricas, con el fin restringir el paso de los iones presentes en una solución acuosa.	Es la tecnología de elección, frente a RO, en el caso de soluciones acuosas de 500 mg/L – 2000 mg/L de sal, ya que los costes de operación son menores. Se emplea en la recuperación de ácidos de los baños electrolíticos y en la eliminación de metales pesados de las aguas de los procesos galvanoplástica.	Necesita energía eléctrica continua, luego la economía del proceso se basa en optimizar la energía eléctrica consumida en la separación del concentrado y el efluente desalinizado. Pueden presentar problemas de mal funcionamiento debido al hinchamiento por absorción de agua de los grupos polares.

Fuente: Fuente: GONZALEZ CABRERA Odonel [et al.] Estudio de patentes sobre tecnologías para tratamiento de agua y el agua residual. [Journal]. - Campinas, Brasil : Scielo. TransInformação., 2014. - 3 : Vol. 26.

Otro aporte significativo fue el estudio de Pasqualino, et al (2010) realizado en una planta residual que contenía diferentes procesos (coagulación, floculación, filtros de arena, desinfección con cloro y tratamiento ultravioleta [UV]), de tal forma que remueve la mayor cantidad de carga contaminante que lleva el efluente, y así conseguir que parte de esta agua al ser intervenida, pueda ser reutilizada en aplicaciones no potables (riego, agricultura, limpieza urbana, extinción de incendios, etc.) y el resto de agua que no se reutilice fuese vertida al mar con concentraciones mínimas para no afectar el desarrollo de la vida marina e igualmente no se alterara las condiciones del mismo.

Finalmente se presenta el estudio realizado por VOURCH, et al (2008) donde la ósmosis inversa presenta mayor eficiencia frente a la nanofiltración, y por este motivo los autores deciden realizar su estudio con ésta tecnología. Un problema que presentó el proceso de ósmosis inversa, fue el ensuciamiento de la membrana debido al depósito de gel de las caseínas y precipitación de fosfato de calcio. La recuperación del agua residual de la industria láctea mediante ósmosis inversa puede ser del 90 al 95%, en el estudio, la materia orgánica se

removió en un 99,8%, la eliminación de materia nitrogenada fue alrededor del 96% y la eliminación de conductividad era aproximadamente un 97%.

Es importante destacar que la selección de la técnica de tratamiento depende básicamente de tres factores que son: las características del vertido, los requerimientos de calidad de agua y los costos y la viabilidad técnica. En el Anexo G se presenta la tabla comparativa que contiene los diferentes tipos de tecnologías, el respectivo tratamiento de regeneración y su uso, como los posibles costos asociados en su construcción y gestión. La técnica de re-uso planteada es el uso de ozono ya que en relación a los estudios presentados y a que es una tecnología implementada en la planta de potabilización de ISAGEN (obteniendo buenos rendimientos en la actualidad) y a que en algunas plantas PTAR a nivel de Colombia ha sido ejecutada.

Partiendo de un caudal promedio de agua tratada en la PTAR de 0,8 L/s, y una vez esta pasa por la etapa de clarificación es tomada del efluente y conducida mediante una bomba a un tanque de almacenamiento con una capacidad de 15 m³, para luego ser conducida mediante una bomba de recirculación por un sistema de combinación Ozono y Peróxido de Hidrógeno, el cual consta de un generador e inyector de Ozono, y un dosificador de Peróxido de Hidrógeno, que actúan como agente oxidante, el agua es conducida a un tanque de Oxidación de cuatro (4) cavidades donde se da el tiempo de contacto y mezcla con el Ozono; aquí se eliminan tanto compuestos orgánicos como metales .

Una vez el agua pasa por la etapa de oxidación, será conducida mediante una bomba a un sistema de filtración y posteriormente a proceso de desinfección con Cloro, y almacenamiento, para luego ser usada en el riego de los prados y el lavado de pisos del Campamento.

Figura 40. Esquema propuesta tecnología reúso del agua



Fuente: Autor

7. CONCLUSIONES

Una vez realizado el análisis e interpretación de resultados como etapa final del análisis de ciclo de vida para el tratamiento de 1 m³ de agua, teniendo en cuenta los procesos de potabilización, distribución y consumo agua, y la depuración de agua residual doméstica, se procedió a establecer las siguientes conclusiones:

- Del análisis de contribución ambiental para el tratamiento de 1 m³ de agua potable utilizando permanganato de potasio y ozono como agentes oxidantes de metales, se logró determinar que el impacto ambiental potencial está dado por el consumo de energía eléctrica (sistema de bombeo y dosificación de químicos), el contenido de metales presentes en el agua (Superficial del Río Sogamoso y Pozo) y el consumo de químicos (soda cáustica, sulfato de aluminio, hipoclorito de calcio, etc.). Este análisis valida que el impacto está dado principalmente en las etapas de captación (28,8% KMnO₄; 33,9% Ozono), almacenamiento previo (27,7% KMnO₄; 32,7% Ozono) y la etapa de floculación (39,6% KMnO₄; 28,6% Ozono).
- Según la comparación sobre la caracterización ambiental del proceso de potabilización con permanganato de potasio y ozono, se encontró mayor impacto ambiental en el Ozono (diferencia del 15% aproximadamente) comparado entre los dos escenarios, para todas las categorías de estudio (mayor impacto en ozono que KMnO₄, debido al consumo de energía para el suministro de ozono), a excepción de la toxicidad humana que se ve afectada significativamente (92% aproximado) en el escenario que utiliza ozono.
- A partir del análisis de impacto ambiental potencial para el proceso de distribución y consumo de agua, se infiere que este proceso impacta en un 95,2% por el consumo de energía eléctrica (usos de oficinas, casino, alojamiento, etc.) afectando la categoría de calentamiento global en un 82%; seguido del consumo de ambientadores, desmanchadores, jabón para losa, etc. (2,56%) y en menor contribución ambiental

(2,19%) el consumo de detergentes y desinfectantes de ropa (lavandería). En donde el consumo de químicos afecta de manera negativa las categorías de ecotoxicidad acuática en un 6% y 5% la toxicidad humana.

- En relación al análisis de caracterización y de contribución ambiental para el Ciclo Integral del Agua del Campamento el Cedral se logró determinar que el mayor impacto obedece al proceso de distribución y consumo de agua potable en un 72.2%, seguido del proceso de potabilización con ozono (25%) y del proceso de depuración de agua residual doméstica (3%). Estos impactos están directamente relacionados al consumo de energía eléctrica en las actividades de oficina, captación y bombeo, succión entre las más importantes.
- Respecto al análisis ambiental del tratamiento de 1 m³ de agua residual doméstica, se logró deducir que el proceso es impactado cerca del 90% por el consumo energético y la diferencia por la concentración de metales y contaminantes presentes en el agua residual como del consumo de hipoclorito para la desinfección, como también, en la generación de lodos al final del tratamiento. La contribución ambiental fue mayor en el sistema de reacción (51,1%), seguido de la etapa de disposición final (15,7%) y mecanismo de succión (15,1%), y finalmente la homogenización (13,7%) y la clarificación en un 4,38%.
- Cabe mencionar que el consumo de energía eléctrica genera impactos potenciales a diferentes categorías como fueron: agotamiento abiótico, acidificación, calentamiento global, toxicidad humana, emisión de óxidos de nitrógeno, oxidación fotoquímica e incremento de ozono, según el porcentaje de contribución mencionado. La contribución ambiental del impacto generado fue diferente para la categoría Eutrofización que se vio afectada por la presencia de fósforo (fosfatos, ortofosfatos, etc.) en el agua residual a tratar (96% planta PTARd), la presencia de óxidos de nitrógeno y azufre en relación al consumo de energía eléctrica (todos los procesos) y al contenido de fósforo y metales en el agua hacer potabilizada (3,39% planta PTAP); como de la categoría Ecotoxicidad, que fue influenciada por los impactos ambientales generados en el consumo de desengrasantes, ambientadores y desinfectantes utilizados en el área de oficinas los

cuales contienen: éter de glicol, ftalatos, bencol, entre otros compuestos químicos (99,99% Proceso de Distribución).

- Con base en el análisis del poder de calentamiento global, esta categoría se ve afectada directamente por el consumo de energía eléctrica procedente de recursos no renovables, pues estos emiten contaminantes como NOx, compuestos orgánicos (volátiles, semivolátiles y condensables) y gases de efecto invernadero como el CO₂, CH₄, N₂O y algunos compuestos halogenados (MOHAMED EL-SAYED, et al., 2010). Por ende, se recomienda disminuir el impacto ambiental potencial a partir del uso de energías renovables o alternativas, como lo es la energía solar o eólica.
- Se logró registrar y documentar el inventario del Ciclo integral del agua en el Campamento El Cedral ubicado dentro en una hidroeléctrica, como función tecnológica local y ambiental, obtenida a través de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida y consolidando la base de datos de escenarios en Colombia.

8. RECOMENDACIONES

Posterior a las conclusiones fue necesario contemplar las siguientes recomendaciones:

- Se sugiere concientizar a la sociedad y a las diferentes industrias en el verdadero aprovechamiento del recurso agua mediante técnicas de re-uso y disposición final del agua vertida. La implementación de cualquier tecnología de reutilización de agua residual tiene sus pros y sus contras, en relación al cuidado del medio ambiente y al mejoramiento en la calidad del agua, siendo de gran importancia para cualquier proceso e industria. No obstante, antes de aplicar cualquier técnica, se debe analizar los impactos negativos que esta genere y minimizarlos mediante el uso de energía renovables o incluso reutilizando los subproductos (gases obtenidos en el proceso convertidos en biogás) (ORTIZ, et al., 2007). Así mismo, el re-uso del agua residual conlleva a la disminución del volumen de agua de vertida a la cuenca hídrica, la disminución de costos energéticos y costos en el tratamiento de agua cruda.
- Una vez implementada la tecnología de reutilización de agua residual se debe validar la disminución de los impactos ambientales y para ello se debe realizar una segunda modelación del ACV con el software y obtener el análisis respectivo. Para ello, se sugiere incluirlas etapas o fases excluidas en las reglas de exclusión del presente documento.

BIBLIOGRAFÍA

AGUILERA Julio Cesar Clasificación temática Consumo básico de agua [Informe]. - Bogotá D.C. : Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico CRA, 2016.

AMORES María [et al.] Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. [Journal]. - España : ELSEVIER, 2012. - Vol. 43.

ATLAS COPCO Consumo de energía en plantas de aguas residuales [Online]. - Atlas Copco, 2010. - 08 2016. - <http://www.atlascopco.com/efficiencyblowerses/energy/water/>.

BALLESTEROS Gregorio Análisis del ciclo de vida del agua urbana [Report] : 10° Congreso Nacional del Medio Ambiente. - Zaragoza : CONAMA, 2010.

BASANTA ALVES Ana Calidad ambiental en la ciudad: contribución del ciclo integral del agua. [Report]. - Sevilla : CONAMA, 2014.

BAUMANN Hemrikke and TILLMAN Anne-Marie The Hitch Hiker's Guide to LCA-An orientation in life cycle assessment methodology and application. [Book]. - Sweden : Chalmers University of Technology, 2004.

BEAVIS P and LUNDIE S Integrated environmental assessment of tertiary and residuals treatment - LCA in the wastewater industry [Journal] // Centre for Water and Waste Technology, University of NSW. - Sydney : Water Sci Technol, 2003. - 12793669.

BENITO DÍAZ Félix Sáez. Estudio preliminar del análisis de ciclo de vida del ciclo integral del agua urbana en zaragoza [Report]. - Zaragoza : Ingeniería Mecánica, 2011.

BENITO DÍAZ Félix Sáez Estudio Preliminar del Análisis del Ciclo de Vida del Ciclo Integral del Agua Urbana en Zaragoza [Report]. - Zaragoza : Universidad de Zaragoza, 2011.

BERGER Markus and FINKBEINER Matthias Water Footprinting: How to Address water use in life cycle Assessment? [Journal]. - Berlin, Germany : Open Access Sustainability, 2010. - ISSN: 2071-1050 : Vol. 2.

BIZKAI LAB Metodología para el Análisis de Ciclo de Vida de Depuradoras de aguas residuales. [Report]. - Bilbo, España : Universidad de Deusto, 2012.

CASARES Carolina Curso de Formación de Formadores: Gestión del Agua - Ciclo Urbano del Agua [Report]. - Madrid, España. : BESEL S.A., 2006.

Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC) Tratamiento de Aguas Residuales en el Contexto del Cambio Climático: Gases de Efecto Invernadero y Análisis de Ciclo de Vida. // Seminario Internacional. - México : UNAM, 2011. - <http://proyectos2.iingen.unam.mx/LACClimateChange/Default.htm>.

CHERMICAROL Carlos Augusto Tratamiento de Aguas residuales municipales en Brasil [Report]. - Brasil : Universidade Federal de Minas Gerais: UFMG, 2010.

CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO - CYTED Capítulo 18: Tecnologías innovadoras en la Regeneración y Reutilización de aguas residuales [Book Section] // Agua Potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados / book auth. DEOCON M, FOLCH M and SALGOT M.. - Argentina : RED IBEROAMERICANA DE POTABILIZACIÓN Y DEPURACIÓN DEL AGUA., 2014.

COBACHO Ricardo Los peajes energéticos en la distribución y el consumo del agua urbana. [Conferencia] // Consumo energético del ciclo integral del agua en usos urbanos y propuestas de ahorro. - Zaragoza, España. : Universidad Politécnica de Valencia, 2010. - http://ecodes.org/articulos-de-opinion/los-peajes-energeticos-en-la-distribucion-y-el-consumo-del-agua-urbana#.V57My_nhDIU.

ECORAEE Informe de Resultados del ACV del proceso. [Report]. - España : Universidad de Vigo, 2013.

EMPRESA METROPOLITANA DE ABASTECIMIENTO Y SANEAMIENTO DE AGUAS DE SEVILLA- EMASESA Gestión ambiental del ciclo del agua [Informe]. - Sevilla : [s.n.], 2013.

Environmental Protection Agency - EPA Consumo de Energía en Plantas de Aguas Residuales (PTARs) [Online]. - Febrero 10, 2010. - [http://www.atlascopco.com/efficiencyblowerses/energy/water/..](http://www.atlascopco.com/efficiencyblowerses/energy/water/)

ESTEVAN Antonio. Análisis del ciclo de vida del agua urbana. [Report]. - España : ECODES, 2007.

FLORES BADOS Josep Proyecto Sostaqua: desarrollos tecnológicos hacia el Ciclo Urbano del Agua Sostenible [Report]. - Barcelona : Centro Tecnológico del Agua - CETaqua, 2010.

FUNDACIÓN CHILE Tecnologías de Intercambio iónico para acondicionamiento y tratamiento de aguas. [Report]. - Chile : CONAMA, 2012.

FUNDACIÓN ECOLOGÍA Y DESARROLLO - ECODES Consumo energético del ciclo integral del agua en usos urbanos [Conferencia] // Consumo energético del ciclo integral del agua en usos urbanos y propuestas de ahorro.. - Zaragoza, España : [s.n.], 2010. - <http://ecodes.org/archivo/proyectos/archivo-ecodes/pages/especial/consumo-energetico-ciclo-integral-agua-usos-urbanos/index.html>.

GALVÍN Marín. El ciclo integral del Agua en Córdoba. Flujos de materia implicados y huella de Carbono asociada. [Conference] // IV Jornada de Ingeniería del Agua. La precipitación y los procesos erosivos de Córdoba.. - Córdoba : DIA, 2015.

GASSÓ Santiago Impactos ambientales de las PTARs. [Report]. - España : Universidad Politécnica de Cataluña, 2011.

GOBIERNO VASCO Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono: Dos maneras de medir el impacto de un producto. [Report]. - Bilbao : IHOBE S.A., 2009.

GONZALEZ BENITEZ Margarita [et al.] El análisis de ciclo de vida como herramienta de sostenibilidad en los proyectos de tratamiento de aguas [Report]. - Barcelona : AFINIDAD LXXI, 2013.

GONZALEZ CABRERA Odonel [et al.] Estudio de patentes sobre tecnologías para tratamiento de agua y el agua residual. [Journal]. - Campinas, Brasil : Scielo. TransInforção., 2014. - 3 : Vol. 26.

GONZÁLEZ J. Categorías de evaluación de impacto de ciclo de vida vinculadas con energía: Revisión y prospectiva. [Conference] // 12th International Conference on Project Engineering. - Barcelona : [s.n.], 2007.

INGENIERÍA DE AGUAS - INGEAGUAS Manual de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de agua potable. Proyecto Hidroeléctrico de Río Sogamoso - Campamento el Cedral. [Informe]. - Betulia, Santander : [s.n.], 2012.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. Norma ISO: 14044 // Gestion Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Marco de Referencia.. - Bogotá D.C. : ICONTEC, 2007.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. Norma: ISO 14040 // Environmental Management – Life cycle assessment – Principles and framework.. - Bogotá D.C. : ICONTEC, 2006.

KURNIAWAN Jermanto and KHARDI Salah Comparison of methodologies estimating emissions of aircarf pollutants, environmental impact assessment [Journal]. - Indonesia : Elsevier, 2011. - Vol. 31. - pp. 240-252.

L J Ricardo Tratamientos avanzados para aguas residuales industriales - Una revisión. [Journal]. - Bogotá D.C. : Universidad Distrital Francisco José de Caldas., 2010.

LEE Mengshan and TANSEL Berrin Life cycle based analysis of demands and emissions for residential water using appliances. [Journal]. - Miami, USA : Journal of Environmental Management, 2012. - Vol. 101.

LEMOs Diogo [et al.] Environmental assessment of an urban water system [Journal]. - Portugal : ELSEVIER, 2013. - Vol. 54.

LIM Seong-Rin [et al.] Urban water infrastructure optimization to reduce environmental impacts and costs [Journal]. - California : ELSEVIER, 2010. - 3 : Vol. 91.

LÓPEZ DE ASIAIN Alberich, EHRENFRIED A and REAL. PÉREZ DEL El ciclo urbano del agua [Report]. - Sevilla, España : Ideas Sostenible, 2007.

LUNDIE Sven, PETERS Gregory and BEAVIS Paul Life Cycle Assessment for Sustainable Metropolitan Water Systems Planning [Journal]. - Australia : Environ Sci Technol, 2004. - 10.1021/es034206m : Vol. 38. - pp. 3465-3473.

MASSAGUÉ Anna Aplicación de una calculadora de huella de carbono en la operación de instalaciones del ciclo urbano de agua: CAFCA. [Conference] // Consumo energético del ciclo integral del agua en usos urbanos y propuestas de ahorro.. - Zaragoza, España : [s.n.], 2010. - <http://ecodes.org/articulos-de-opinion/aplicacion-de-una-calculadora-de-huella-de-carbono-en-la-operacion-de-instalaciones-del-ciclo-urbano-de-agua-cafca#.V57GWfnhDIU>.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE Ciclo integral del agua urbana, sistemas de gestión y atención al ciudadano, captación y potabilización, distribución, alcantarillado y drenaje urbano, depuración y gestión de lodos. [Report]. - España. : Gobierno de España, 2015.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE La planificación coordinada del agua y la energía [Report]. - España : Gobierno de España, 2015.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. Ciclo integral del agua urbana: sistema de gestión y atención al ciudadano, captación y potabilización, distribución, alcantarillado y drenaje urbano, depuración y gestión de lodos. [Report]. - España : Gobierno de España, 2011.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE RESOLUCIÓN 1207 [Report]. - Bogota D.C. : [s.n.], 2014.

MOHAMED EL-SAYED Mohamed [et al.] Towards sustainability in urban water: a life cycle analysis of the urban water system of Alexandria City, Egypt. [Journal] // ELSEVIER- JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION. - 2010. - Vol. 18. - pp. 1100-1106.

MOHAPATRA P [et al.] Improving eco-efficiency of Amsterdam water supply: A LCA approach. [Journal]. - Indian : Research and technology aqua, 2002.

MUÑOZ ORTIZ I [et al.] Life Cycle Assessment of urban wastewater reuse with ozonation as tertiary treatment. [Journal] // ScienceDirec-ELSEVIER. - 2009. - 0048-9697. - pp. 1245-1256.

NOYOLA ROBLES A [et al.] Water and sanitation: LAC cities adapting to climate change by making better use of their available bioenergy resources. [Report]. - Ciudad de México : Instituto de Ingeniería UNAM, 2013.

ODUM Howard and ODUM B. Concepts and methods of ecological engineering. Ecological Engineering [Journal]. - Florida, USA. : ELSEVIER, 2003. - 5 : Vol. 20.

OFICINA CATALANA DEL CAMBIO CLIMATICO - OCCC CÀLCUL DE LES EMISSIONS DE GEH DERIVADES DEL CICLE DE L'AIGUA DE LES XARXES URBANES A CATALUNYA [Informe]. - Cataluña : Dirección General de Políticas Ambientales y la Agencia Catalana del Agua (ACA), 2015.

ORTA DE VELÁSQUEZ María Teresa. Uso del ozono en el tratamiento de aguas residuales para la remoción de Vibrio Cholerae, fenotipo rugoso resistente al cloro. // XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.. - Cancún, México : Instituto de Ingeniería UNAM, 2002.

ORTIZ M [et al.] Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town [Journal] // ScienceDirect - ELSEVIER. - 2007. - pp. 121-131.

PASCUALINO Jorgelina, MENESES Montse and CASTELLS Francesc Life Cycle Assessment of Urban Wastewater Reclamation and Reuse Alternatives [Journal] // Journal of Industrial Ecology - Research and Analysis. - 2010. - DOI: 10.1111/j.1530-9290.2010.00293.x : Vol. 15. - pp. 49-63.

PENAGOS Guillermo. Life Cycle Master of Science: Assessment of Urban Water Systems: A Preliminary of review of Environmental Sustainability. [Journal]. - Netherlands : UNESCO-IHE (Institute for water education), 2007.

PEREZ PARRA Jerónimo. Depuración y reutilización de aguas residuales para riego. [Report]. - Almería - España : Estación Experimental de Cajamar 'Las Palmerillas', 2013. - pp. 447-469.

POCH BARRERA Andrés. Comparación medioambiental de dos plantas de producción de agua potable basada en el método ACV. [Report]. - Barcelona : Escola de Camins, 2013.

QI Cheng and CHANG Ni-Bing. Integrated carbon footprint and cost evaluation of a drinking water infrastructure system for screening expansion alternatives. [Journal]. - Orlando, Florida : ELSEVIER, 2012. - Vol. 60.

RALUY RIVERA Rosa Gemma. Tesis Doctoral: Evaluación ambiental de la integración de procesos de producción de agua con sistemas de producción de energía. [Report]. - Zaragoza : Centro Politécnico Superior, 2009.

RECKMANN Karoline. Life cycle assessment of pork especially emphasising feed and pig production. [Journal]. - Germany : Journal of Environmental Management, 2012. - Vol. 107.

RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ Antonio [et al.] Informe de Vigilancia Tecnológica: Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. [Report]. - Madrid : CITME, CEIM, UNIVERSIDAD DE ALCALÁ Y REY JUAN CARLOS., 2006. - pp. 46-91.

RYGAARD Martin, BINNING Philip and ALBRECHTSEN HansJorgen. Increasing urban water self-sufficiency: New era, new challenges. [Journal]. - Lyngby,Denmark : ELSEVIER, 2010. - 1 : Vol. 92.

SANZ CONTRERAS Jose Evaluación y corrección de impactos ambientales [Book Section] // Concepto de impacto ambiental y su evaluacion. - Madrid : Instituto Tecnológico Geominero de España, 1991.

SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE - SENA. Operación y mantenimiento de plantas de potabilización de agua. [Report]. - Bogotá D.C. : [s.n.], 2012.

TARANTINI Mario and FERRI Federica LCA of drinking and wastewater treatment systems of Bologna city: final results. [Journal]. - Italian : ENEA OTSCA-00024, 2001.

TECNOLOGÍAS ECOLOGICAS - TECO Manual de operación y mantenimiento planta de tratamiento de aguas residuales [Report]. - Medellín : [s.n.], 2015.

UCHE Javier Análisis de Ciclo de Vida del Ciclo Integral del Agua: una perspectiva más global en el uso eficiente en el agua. [Report] / Dirección de la División de Recursos Naturales. - [s.l.] : CIRCE, 2011.

VARÓN HOYOS Manuel Alejandro. Agua para uso doméstico en la ciudad de Pereira: Análisis de Ciclo de Vida y escenarios de manejo ambiental. [Report]. - 2015 : Universidad Tecnológica de Pereira, 2015.

VENKATESH G and BRATTEBO Helge. Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services: Case study of Oslo (Norway) [Journal]. - Norway : ELSEVIER, 2011. - 2 : Vol. 36.

VERSTRAETE Willy, VAN DE CAVEYE Pieter and DIAMANTIS Vasileios. Maximum use of bioresources present in domestic "used water". Bioresource Technology. [Journal]. - Bélgica : ELSEVIER, 2009. - 23 : Vol. 100.

VINCE Francois [et al.] LCA tool for the environmental evaluation of potable water production. Desalination. [Journal]. - Paris, Francia. : ELSEVIER, 2008. - 1 : Vol. 220.

VOURCH MICKAEL [et al.] Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse [Journal] // ScienceDirect - ELSEVIER. - 2008. - 10.1016/j.desal.2007.05.013 : Vol. 219. - pp. 190-202.

ZAMBRANO D [et al.] Análisis de Ciclo de Vida en Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. [Report]. - Cali : Conferencia Latinoamericana de Saneamiento - LATINOSAN, 2007.

ANEXOS

Anexo A. Términos y Definiciones.

Análisis de sensibilidad: procedimiento sistemático para estimar los efectos sobre el resultado de un estudio de las opciones elegidas en lo que respecta a métodos y datos.

Análisis del ciclo de vida: recopilación y evaluación de las entradas, resultados y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto durante su ciclo de vida.

Análisis del inventario del ciclo de vida: fase del análisis del ciclo de vida que implica la recopilación y la cuantificación de entradas y resultados de un sistema del producto durante su ciclo de vida.

Asignación: distribución de los flujos de entrada o de salida de un proceso o un sistema del producto entre el sistema del producto bajo estudio y uno o más sistemas del producto diferentes.

Aspecto ambiental: elemento de las actividades, productos o servicios de una organización que puede interactuar con el medio ambiente.

Calidad de los datos: característica de los datos que se relaciona con su capacidad para satisfacer los requisitos establecidos.

Categoría de impacto: clase que representa asuntos ambientales de interés a la cual se pueden asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida.

Ciclo de vida: etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final.

Co-producto: cualquier producto de entre dos o más productos provenientes del mismo proceso unitario o sistema del producto.

Emisiones y vertidos: emisiones al aire y vertidos al agua y suelo.

Energía de proceso: entrada de energía requerida en un proceso unitario, para llevar a cabo el proceso o hacer funcionar el equipo, excluyendo las entradas de energía para la producción y suministro de esta energía.

Entrada auxiliar: materia que entra y se utiliza en el proceso unitario para obtener el producto, pero que no constituye una parte del producto.

Evaluación: elemento dentro de la fase de interpretación del ciclo de vida que pretende establecer confianza en los resultados del análisis del ciclo de vida.

Evaluación del impacto del ciclo de vida: fase del análisis del ciclo de vida dirigida a conocer y evaluar la magnitud y cuán significativos son los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a lo largo de todo el ciclo de vida del producto.

Factor de caracterización: factor que surge de un modelo de caracterización que se aplica para convertir el resultado del análisis del inventario del ciclo de vida asignado a la unidad común del indicador de categoría.

Flujo elemental: materia o energía que entra al sistema bajo estudio, que ha sido extraído del ambiente sin una transformación previa por el ser humano, o materia o energía que sale del sistema bajo estudio, que es liberado al medio ambiente sin una transformación posterior por el ser humano

Flujo de energía: entrada o resultado de un proceso unitario o sistema del producto, expresada en unidades de energía.

Flujo de referencia: medida de las salidas de los procesos, en un sistema del producto determinado, requerida para cumplir la función expresada mediante la unidad funcional.

Indicador de categoría de impacto: representación cuantificable de una categoría de impacto.

Interpretación del ciclo de vida: fase del análisis del ciclo de vida en la que los hallazgos del análisis del inventario o de la evaluación del impacto, o de ambos, se evalúan en relación con el objetivo y el alcance definidos para llegar a conclusiones y recomendaciones.

Límite del sistema: conjunto de criterios que especifican cuáles de los procesos unitarios son parte de un sistema del producto.

Materia prima: materia primaria o secundaria que se usa para elaborar un producto.

Proceso: conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados.

Proceso unitario: elemento más pequeño considerado en el análisis del inventario del ciclo de vida para el cual se cuantifican datos de entrada y salida.

Punto final de categoría: atributo o aspecto del entorno natural, la salud humana o los recursos que identifica un asunto ambiental de interés.

Residuo: sustancias u objetos a cuya disposición se procede o se está obligado a proceder cuyo poseedor tiene la intención o le es requerido que los disponga.

Revisión crítica: proceso que pretende asegurar la coherencia entre un análisis del ciclo de vida y los principios y requisitos de las Normas Internacionales sobre análisis del ciclo de vida

Sistema del producto: conjunto de procesos unitarios con flujos elementales y flujos de producto, que desempeña una o más funciones definidas, y que sirve de modelo para el ciclo de vida de un producto.

Transparencia: presentación de información de forma abierta, exhaustiva y comprensible

Unidad funcional: desempeño cuantificado de un sistema del producto para su utilización como unidad de referencia.

Anexo B. Descripción de Métodos de Evaluación de ACV.

Tabla 32. Métodos de Evaluación de Impactos en la metodología ACV.

Metodología	FASES DE EICV					Creador	Categorías de Impacto Ambiental	Descripción
	Clasificación	Caracterización	Normalización	Agrupación	Ponderación			
Ec 99	✓	✓	✓	✓	✓	Pré Consultans	Carcinogénicos Respiratorios orgánicos Respiratorios inorgánicos Cambio Climático Radiación Destrucción capa ozono Ecotoxicidad Acidificación y eutrofización Uso de suelo Uso de recursos minerales Uso de combustibles fósiles	Sucesor del Eco-Indicador 95. Su desarrollo comenzó con el estudio de asignación de pesos para el Eco-Indicador 95. Se cambió el sistema de evaluación de impactos: En lugar de evaluar cada una de las categorías de impacto, se evaluaron los diferentes daños causados por estas categorías de impacto, agrupándolos en tres niveles de daño: Daños a la salud Humana, Daños a la calidad del Ecosistema, Daños a los Recursos.
RECIPE	✓	✓	✓	✓	✓	Pré Consultans	Destrucción capa ozono Toxicidad humana Radiación Smog fotoquímico Formación particulados Cambio Climático Ecotoxicidad al suelo Acidificación al suelo Ocupación suelo rural Ocupación suelo urbano Transformación suelo natural Ecotoxicidad marina Eutrofización marina Eutrofización agua dulce Ecotoxicidad agua dulce Uso de combustibles fósiles Uso de recursos naturales Uso de agua	ReCiPe se desarrolló para combinar las ventajas de los métodos CML2001 y Eco-Indicador99. La ventaja del método CML es su solidez científica, mientras que la ventaja del Eco-indicador 99 es su facilidad de interpretación. Con ello, se han mejorado los modelos para el cambio climático, la destrucción de la capa de ozono, acidificación, eutrofización, uso del suelo y agotamiento de recursos naturales. A su vez se han actualizado factores de caracterización para algunas categorías de impacto y para el paso de normalización.
CML 2001	✓	✓	✓	X	X	Centre of Environmental Science (CML)	Agotamiento de los recursos Cambio Climático Destrucción capa ozono Toxicidad humana Ecotoxicidad Smog fotoquímico Acidificación Eutrofización Uso de recursos	Método basado en el anterior CML 1992. El paso de normalización es opcional para ACVs simplificados, pero obligatorio para ACVs exhaustivos. Dispone de valores de referencia para la normalización de los indicadores de las categorías de impacto: A nivel mundial en 1990, a nivel europeo en 1995 y a nivel holandés en 1997.

Metodología	FASES DE EICV					Creador	Categorías de Impacto Ambiental	Descripción
	Clasificación	Caracterización	Normalización	Agrupación	Ponderación			
IPCC	✓	✓	X	X	X	Intergovernmental Panel on Climate Change	Cambio Climático	Este método, cuya definición comenzó en 1988, recoge los factores de caracterización para el potencial del calentamiento global directo debido a emisiones al aire.
EDIP/UMIP 96	✓	✓	X	X	X	Environmental Design of Industrial Products (EDIP)	Cambio Climático Destrucción capa ozono Acidificación Eutrofización Smog fotoquímico Ecotoxicidad acuática Ecotoxicidad del suelo Toxicidad humana Residuos Uso de recursos	Método cuyo desarrollo comenzó en 1996 en Dinamarca. Los factores de normalización están basados en equivalentes - persona en el año 1990. Para la categoría de uso de recursos, la normalización y ponderación están incluidas dentro de la fase de caracterización, ya que esta categoría se evalúa de manera distinta manera en este método. Los factores de ponderación son definidos como distancia al objetivo por persona para el año 2000.
EPS 2000	✓	✓	X	X	✓	Centre of Environmental Assessment of products material	Salud humana Capacidad de producción del ecosistema Reserva de recursos abióticos Diversidad biológica Valores culturales	La metodología EPS2000 (Environmental Priority Strategies in product design) es un método orientado al daño causado. En él se tiene en cuenta la voluntad de pagar para restaurar los cambios causados. Por ello la unidad del indicador final es el ELU (Environmental Load Unit).
ECOPOI NTS97	X	✓	✓	X	✓	Swiss Ministry of the Environment (BUWAL)	Emisiones al aire Vertidos de aguas superficiales Vertidos de aguas subterráneas Vertidos al suelo Uso de recursos Residuos	Fue uno de los primeros métodos con método de ponderación final (1999). Es un método basado en la política medio-ambiental suiza. Este método no dispone de paso de clasificación, sino que evalúa los impactos de manera individual.
IMPACT 2002 +	✓	✓	✓	✓	✓	Instituto de Tecnología federal Suizo de Lausanne	Toxicidad humana Efectos respiratorios Radiación ionizante Destrucción capa ozono Smog fotoquímico Ecotoxicidad acuática Ecotoxicidad del suelo Acidificación acuática Acidificación del suelo Ocupación del suelo Cambio Climático Energías no renovables Uso de recursos	Resulta de una combinación entre las metodologías IMPACT2002, Ec99, CML2001 e IPCC.

Fuente: GOBIERNO VASCO Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono: Dos maneras de medir el impacto de un producto. [Report]. - Bilbao : IHOBE S.A., 2009.

Anexo C. Descripción de Categorías de Impacto, Método CML.

- **El agotamiento de recursos abióticos:**

Este indicador categoría de impacto está relacionado con la extracción de minerales y combustibles fósiles, debido a las entradas en el sistema. Se puede definir como la disminución de la disponibilidad de recursos naturales. Se incluye en esta categoría recursos abióticos y energía BIZKAI LAB, (2012):

$$AR = \sum_i^n F_i * m_i$$

Donde AR es el indicador de agotamiento de recursos abióticos, m_i es la cantidad del recurso utilizado en kg, m^3 o MJ, y F_i es el factor de caracterización de este recursos. Tradicionalmente su agotamiento se calculaba como la relación entre lo usado y la cantidad total de reserva de este recurso, siendo F_i la inversa de la reserva (kg^{-1}). En este caso AR sería dimensional. Las críticas que se han hecho a este índice se refieren a que no distingue entre recursos que sean más o menos escasos, y recursos que pueden regenerarse.

Tabla 33. Factores de caracterización del Agotamiento de recursos Abiótico.

Substancia	Recurso	ADF (kg eq. SB kg-1)
Antimonio		1
Azufre	S en suelo	0,000358
Bauxita	Al ₂ O ₃ , mineral	-
Calcio		7,08E-10
Carbón	en suelo	0,00363
Cloro		4,86E-08
Cloruro potásico	KCl, como K ₂ O en suelo	-
Cobre	Cu, mineral	0,00194
Cromo	Cr, mineral	-
Fosfatos	en suelo	-
Gas Natural	en suelo	0,32
Hierro	Fe, en suelo	8,43E-08
Lignito	en suelo	-
Magnesio		3,73E-09
Manganeso	Mn, en suelo	0,0000138
Níquel	Ni, en suelo	-
Perlita	SiO ₂	-
Petróleo	en suelo	0,436
Plata	Ag, mineral	1,84
Plomo	Pb, mineral	0,0135
Potasio	K, como K ₂ O, en suelo	3,13E-08
Sodio		8,24E-11

- **Acidificación:**

Consiste en la deposición de ácidos resultantes de la liberación de óxidos de nitrógeno y sulfuro en la atmosfera, en el suelo y en el agua, dónde puede variar la acidez del medio cosa que afectara a la flora y fauna que habita en él, produce deforestación y también puede afectar a los materiales de la construcción. Las áreas de protección serán salud humana, recursos naturales, entorno natural y modificado por el ser humano (BIZKAI LAB, 2012).

En indicador para la categoría de acidificación, AI, g eq.H⁺ y se expresa como,

$$AI = \sum_i^n AP_i * m_i$$

Donde m_i es la masa en kg de la substancia i y AP es el potencial de acidificación. El AP de una substancia i se puede calcular como el potencial de iones H⁺ equivalentes que puede emitir dicha substancia i. Las diferentes emisiones podrán ser sumadas basándose en su potencial de formar iones H⁺. El AP de una substancia se calculara según la siguiente ecuación definiéndose como el número de que pueden ser producidos por cada kg de substancia i:

$$AP_i = \frac{\mu_{H^+} * M_{H^+}}{M_i}$$

Donde μ_{H^+} (mol * kg⁻¹) representa el número de iones H⁺ que pueden ser potencialmente producidos por un kg de substancias i y M_{H⁺} (kg* mol⁻¹) el peso equivalente de un mol H⁺ y M_i el peso equivalente de la substancia i.

Tabla 34. Factores de caracterización, categoría Acidificación.

Substancia	Símbolo	AP (g eq. H+g-1)
Ácido Clorhídrico	HCl	0,02074
Ácido Fluorhídrico	HF	0,05
Ácido Sulfhídrico	H2S	0,059
Ácido Sulfúrico	H2SO4	2,00E-02
Amoníaco	NH3	0,059
Dióxido de Nitrógeno	NO2	2,20E-02
Óxidos de Azufre	SO2	0,03125

- **Cambio climático:**

La tierra absorbe la radiación del sol. Esta energía es redistribuida por la atmosfera y los océanos, y retornada en forma de radiación de infrarrojo térmico. Parte de esta radiación es absorbida por los gases existentes en la atmosfera provocando el calentamiento del plante, a este fenómeno se conoce como efecto invernadero (*Global Warming*). Estos gases son principalmente el vapor de agua y CO₂ y otros gases como CH₄, N₂O y CFCs. La acción

humana ha provocado un incremento de estos gases lo que lleva o puede llevar a un sobrecalentamiento del planeta y por lo tanto a una alteración de sus condiciones.

Esta categoría de impacto afectara a las áreas de salud humana, ambiental natural y ambiente modificado por el hombre. El indicador que sirve para evaluar este impacto se expresará como CCI (*Climate Change Indicator*). Su medida se hará relativa respecto al efecto producido por un kg de CO₂ y se calculará mediante la ecuación BIZKAI LAB, (2012):

$$CCI = \sum_i^n GWP_i * m_i$$

Donde es la masa de la substancia expresada en kg y es el potencial de calentamiento global, un factor desarrollado para comparar las emisiones de diferentes gases invernaderos. Se define como la relación entre la contribución a la absorción de calor resultante de la emisión de 1 kg de un gas con efecto invernadero y la emisión equivalente de CO₂ a lo largo de un tiempo t (20, 100 o 500 años).

GWP dependerá del tiempo de integración. La elección de dicho periodo vendrá determinada por el tipo de efectos que se pretendan analizar. Para estudios en los que se quiere predecir efectos a largo plazo se utilizaran tiempos largos de 100 o 500 años. Para evaluar efectos de las emisiones a corto plazo utilizaremos tiempos de integración de 20 a 50 años.

Tabla 35. Factores de caracterización, GWPP en kgCO₂ kg-1. Fuente: IPCC 2007.

Substancia	Símbolo	GWP20	GWP100	GWP500
Dióxido de Carbono	CO ₂	1	1	1
Metano	CH ₄	72	25	7,6
Óxido de Nitrógeno	N ₂ O	289	298	153
CFC-11	CCl ₃ F	6730	4750	1620
Halón 1301	CBrF ₃	8480	7140	2760
Tetrafluoruro de Carbono	CF ₄	5210	7390	11200

▪ Eutrofización

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

Las áreas de protección serán: entornos natural y modificado por el ser humano, y recursos naturales. La eutrofización causada por N y P (medido como O₂) es cuantificada y sumada para el cálculo de su contribución potencial a la formación de biomasa (34). Los potenciales de eutrofización, EP son utilizados como factor de caracterización para calcular el indicador total para dicha categoría, EI:

$$EI = \sum_i^n EP_i * m_i$$

Donde es la m_i masa en kg de la sustancia i emitida al aire, agua o suelo. El total se expresará como kg de PO_4^{3-} . El cálculo de EP se realizará según la siguiente ecuación.

$$EP_i = \frac{v_i / M_i * N_{O_2} / A_e}{1 / M_{PO_4^{3-}} * N_{O_2} / A_p}$$

Donde v_i es el número de moles de N o P en una molécula del compuesto i , M es la masa moléculas ($kg \cdot mol^{-1}$), N_{O_2} es el número de moles de O₂ consumidos durante la degradación de las algas, A_e es el número de moles de N o P contenidos en una molécula de algas. Se toma la composición del alga "Redfield" $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ asumiéndose esta como la composición media de los organismos acuáticos. El oxígeno requerido para su degradación se medirá en forma de DQO, asumiéndose que un mol de biomasa precisará de 138 moles de O₂ para su degradación.

Tabla 36. Factores de caracterización, Categoría Eutrofización.

Substancia	Símbolo	AP (g eq. PO ₄ g ⁻¹)
Amoníaco	NH ₃	0,35
Amonio	NH ₄ ⁺	0,42
Dióxido de Carbono	NO ₂	0,13
Demanda química oxígeno	DQO	0,022
Fosfatos	PO ₄ , HPO ₄ , H ₂ PO ₄	30,6
Fósforo	PO ₄ , HPO ₄ , H ₂ PO ₄	30,6
Nitratos	NO ₃ ⁻	0,095
Nitritos	NO ₂ ⁻	0,13
Nitrógeno	N ₂	0,42
Óxido de Nitrógeno	N ₂ O	0,27
Pentóxido de Fósforo	P ₂ O ₅	1,336

- **Toxicidad**

En esta categoría se contemplan los efectos sobre el ser humano y los ecosistemas acuáticos y terrestres de las sustancias tóxicas existentes en el ambiente. Afecta a las áreas de protección

salud humano, entorno natural y recursos naturales. Estas categorías son aquellas para las cuales el factor destino y especialmente el transporte a través de diferentes medios, “intermedia transport” tiene más importancia.

El cálculo del impacto de toxicidad en humanos vendrá determinado por,

$$HTI = \sum_n \sum_i HTP_{i,n} * f_{i,n} * m_i$$

Siendo HTP el factor de caracterización, cuyas unidades van a depender del método utilizado para su caracterización, $f_{i,n}$ la fracción de la sustancia i que se transporta desde el invernadero al medio ambiental n , adimensional y m_i la masa emitida de cada contaminante.

De igual manera el cálculo de la ecotoxicidad acuática, ATI, se calculará mediante la expresión:

$$ATI = \sum_n \sum_i ATP_{i,n} * f_{i,n} * m_i$$

y la ecotoxicidad terrestre, :

$$TTI = \sum_n \sum_i TTP_{i,n} * f_{i,n} * m_i$$

Siendo ATP y TTP los factores de caracterización para la toxicidad de los ecosistemas acuático y terrestre respectivamente. La siguiente tabla, recoge los factores de caracterización. En este caso las unidades para el factor de caracterización de toxicidad humana son los kg equivalentes de plomo en el aire por kilo de sustancia, para toxicidad en ecosistemas acuáticos, kg equivalentes de Zinc en el agua por kilos de sustancia y para ecotoxicidad terrestre kg equivalentes de Zinc en el suelo por kilo de sustancia.

Tabla 37. Factores de equivalencia HTP, ATP, TTP, Categoría Toxicidad. Fuente: IPCC 2007.

Substancia	HTP (kg eq.Pb _{aire} kg ⁻¹)	ATP (kg eq.Zn _{agua} kg ⁻¹)	TTP (kg eq.Zn _{suelo} kg ⁻¹)
AIRE			
Aldehído	0,0087	-	-
Arsénico	9	0,078	0,75
Benceno	0,012	-	-
Cadmio	19	79	3,14
Cobalto	129	-	0,08
Cobre	145	0,66	0,14
Cromo	3,7	0,39	0,08
Estaño	9	-	-
Formaldehído	0,0099	-	-
Mercurio	46	196	5,94
Monóxido Carbono	0,00014	-	-
Níquel	370	0,12	0,35
Óxido de Azufre	0,0075	-	-

Substancia	HTP (kg eq.Pb _{aire} kg ⁻¹)	ATP (kg eq.Zn _{agua} kg ⁻¹)	TTP (kg eq.Zn _{suelo} kg ⁻¹)
Óxido de Nitrógeno	0,002	-	-
Partículas	0,0075	-	-
Plomo	2,3	1,28	0,13
Selenio	64	-	-
Zinc	27	0,076	0,33
SUELO		-	-
Arsénico	0,7	-	-
Cadmio	1,46	-	-
Cobalto	1	-	-
Cobre	0,009	-	-
Cromo	0,29	-	-
Mercurio	3,6	-	-
Níquel	0,0029	-	-
Plomo	0,6	-	-
Zinc	0,0007	-	-
AGUA		-	-
Aceites		0,13	-
Arsénico	1,5	-	-
Cadmio	3,2	520	-
Cobalto	2,2	-	-
Cobre	0,022	5,2	-
Cromo	0,62	2,6	-
DBO5	0,022	0,00013	-
Estaño	0,0015	-	-
Fenoles	0,052	15,4	-
Fluoruros	0,045	-	-
Fosfatos	0,0000032	0,01	-
Mercurio	7,8	1,3	-
Níquel	0,062	0,79	-
Plomo	0,86	5,2	-
Selenio	10,9	-	-
Zinc	0,0032	1	-

Anexo D. Categorías de Impacto, Método CML 2001. Versión 2.04. SimaPro.

Tabla 38. Categorías de Impacto según el Método CML 2001.

Categoría de impacto	Unidad	Categoría de impacto	Unidad
Abiotic depletion	kg Sb eq	Marine aquatic ecotox. 100a	kg 1,4-DB eq
Acidification	kg SO2 eq	Marine aquatic ecotox. 20a	kg 1,4-DB eq
Average European (kg NOx eq)	kg NOx eq	Marine aquatic ecotox. 500a	kg 1,4-DB eq
Average European (kg SO2-Eq)	kg SO2 eq	Marine aquatic ecotoxicity infinite	kg 1,4-DB eq
Equal benefit incremental reactivity	kg formed O3	Marine sediment ecotox. 100a	kg 1,4-DB eq
Eutrophication	kg PO4--- eq	Marine sediment ecotox. 20a	kg 1,4-DB eq
Fresh water aquatic ecotox. infinite	kg 1,4-DB eq	Marine sediment ecotox. 500a	kg 1,4-DB eq
Freshwater aquatic ecotox. 100a	kg 1,4-DB eq	Marine sediment ecotox. infinite	kg 1,4-DB eq
Freshwater aquatic ecotox. 20a	kg 1,4-DB eq	Max. incremental reactivity	kg formed O3
Freshwater aquatic ecotox. 500a	kg 1,4-DB eq	Max. ozone incremental reactivity	kg formed O3
Freshwater sediment ecotox. 100a	kg 1,4-DB eq	Ozone layer depletion 10a	kg CFC-11 eq
Freshwater sediment ecotox. 20a	kg 1,4-DB eq	Ozone layer depletion 15a	kg CFC-11 eq
Freshwater sediment ecotox. 500a	kg 1,4-DB eq	Ozone layer depletion 20a	kg CFC-11 eq
Freshwater sediment ecotox. infinite	kg 1,4-DB eq	Ozone layer depletion 25a	kg CFC-11 eq
Global warming 100a	kg CO2 eq	Ozone layer depletion 30a	kg CFC-11 eq
Global warming 20a	kg CO2 eq	Ozone layer depletion 40a	kg CFC-11 eq
Global warming 500a	kg CO2 eq	Ozone layer depletion 5a	kg CFC-11 eq
Human toxicity 100a	kg 1,4-DB eq	Ozone layer depletion steady state	kg CFC-11 eq
Human toxicity 20a	kg 1,4-DB eq	Photochemical oxidation	kg C2H4
Human toxicity 500a	kg 1,4-DB eq	Photochemical oxidation (low NOx)	kg C2H4 eq
Human toxicity infinite	kg 1,4-DB eq	Terrestrial ecotoxicity 100a	kg 1,4-DB eq
Ionising radiation	DALYs	Terrestrial ecotoxicity 20a	kg 1,4-DB eq
Land competition	m2a	Terrestrial ecotoxicity 500a	kg 1,4-DB eq
Lower limit of net global warming	kg CO2 eq	Terrestrial ecotoxicity infinite	kg 1,4-DB eq
Malodours air	m3 air	Upper limit of net global warming	kg CO2 eq

Anexo E. Caracterización Trimestral de Agua antes y después de los puntos de estudio.

Tabla 39. Caracterización de Agua de Pozo

ANÁLISIS	MÉTODO ANÁLISIS	UNIDADES	08/03/2016	15/12/2015	03/09/2015	16/06/2015
Coliformes totales	SM 9223B	NMP/100 ml	-	3	3	-
Coliformes fecales	SM 9223B	NMP/100 ml	-	3	3	-
Mesofilos totales	SM 9215D	UFC/100 ml	-	-	-	-
Alcalinidad	SM 2320	mg CaCO ₃ /L	21,5	19,2	22,1	22,2
Calcio	SM 3111B	mg Ca/L	2,9	3,6	3	1,7
Cloruros	SM 4500 Cr B	mg Cl/L	5,1	1,5	1,4	1,4
Conductividad	SM 2510B	uS/cm	57,8	184,8	59,1	55,8
DBO ₅	SM 5210B	mg O ₂ /L	2,5	3,8	1,1	1,1
DQO	SM 5220C	mg O ₂ /L	10,3	10,3	10,3	10,3
Dureza Cálrica	SM 3500 Ca B	mg CaCO ₃ /L	3	3	3	4,2
Dureza Magnésica	SM 3500 Mg B	mg CaCO ₃ /L	4,4	4,4	4,4	8,8
Dureza Total	SM 2340 C	mg CaCO ₃ /L	10,3	10	9,9	13
Fosfatos	SM 4500 P E	mg PO ₄ ³⁻ /L	0,21	0,153	0,153	0,153
Hierro Total	SM 3030 E	mg Fe/L	0,095	0,095	0,095	0,126
Mesoaerobios	TF/NMP	NMP/100 ml	100	35	70	
Nitratos	J.R. Caron y Bacquet	mg NO ₃ ⁻ /L	0,4	0,4	0,4	0,4
Ortofosfatos	SM 4500 P-E	mg PO ₄ ³⁻ /L	0,21	0,149	0,31	0,153
Oxígeno Disuelto	SM 4500 O-G	mg/L	6,5	5,54	4,2	6,4
Sólidos Suspendidos Totales	SM 2540 D	mg/L	37,4	5,5	5,5	5,5
Sólidos Totales	SM 2540 B	mg/L	60,4	14,6	6,6	26,7
Sulfatos	SM 4500 S04	mg SO ₄ ²⁻ /L	10	10	10	10
Turbiedad	SM 2130 B	SM 2130 B	1,8	1,8	1,8	1,8

Tabla 40. Caracterización de Agua Superficial (Río Sogamoso)

Variable	Método	Unidad	Valor Referencia	Río Sogamoso Antes Captación			Río Sogamoso Punto Vertimiento		
				Sept.	Diciembre	Marzo	Sept.	Diciembre	Marzo
Alcalinidad Total	St. Mth 2320 B	mg CaCO3/L	Máx. 200	60,50	53,80	61,80	64,60	55,40	65,80
Cloruros	St. Mth 4500-Cl-B	mg Cl/L	Máx. 250	3,80	1,90	8,50	4,90	2,40	8,60
Coliformes totales	St. Mth 9222 B	UFC/100 mL	Máx 20000(salida)	671,00	4600,00	1100,00	460,00	460,00	4600,00
Color Aparente	St. Mth 2120 C	Pt-Co	Máx. 75	19,00	93,80	29,30	60,00	114,00	46,50
Conductividad a 25°C	St. Mth 2510 B	us/cm	Hasta 1000	230,00	185,50	224,00	232,00	188,00	228,00
DBO	St. Mth 5220 C	mg O2/L	-	5,40	5,00	1,10	1,10	4,40	6,70
DQO	St. Mth 5210 B	mg O2/L	-	10,30	10,30	10,30	10,30	10,30	11,50
Dureza Total	St. Mth 2340 C	mg CaCO3/L	Máx. 300	81,50	77,40	84,60	81,10	84,70	83,60
Fosfatos	St. Mth 3111 B	mg PO4-3/L		0,15	0,15	0,15	0,17	0,15	0,15
Hierro Total	St. Mth 3111 B	mg Fe/L	Máx. 0,3	0,59	0,65	0,10	0,56	0,59	0,10
Nitratos	J.R.Caron Bacquet	mg NO3-N/L	Máx.10	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Nitrogeno Total	St. Mth 4500 N B	mg N/L		0,00	0,00	0,00	0,27	0,21	0,16
Ortofosfatos	St. Mth 4500 PE	mg PO4-3/L		0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Oxígeno Disuelto		mg/L		4,20	3,81	5,40	4,80	5,54	6,50
pH	St. Mth 4500 H+B	Ph	6,5 - 9,0	7,38	7,76	7,50	7,68	7,85	7,40
Sólidos Suspendidos	Potenciometrico	mg/L	-	73,00	69,00	43,40	69,00	12,50	50,90
Sólidos Totales		mg/L	-	78,00	79,80	129,00	129,90	86,00	163,00
Sulfatos	St. Mth 4500 SO4E	mg SO4/L	Máx. 250	26,90	10,00	14,40	27,00	10,00	14,80
Turbidez	St. Mth 2130 B	NTU	Máx. 190	75,40	32,90	2,60	67,90	29,60	7,80

Fuente: Autor

Tabla 41. Caracterización de Agua a la Entrada de la de Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP).

Variable	Método	Unidad	Valor Referencia	Resultado Entrada a la PTAP					
				Enero	Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Marzo
pH	St. Mth 4500 H+B	pH	6,5 - 9,0	7,44	7,18	8,32	7,54	7,73	7,06
Conductividad a 25°C	St. Mth 2510 B	us/cm	Hasta 1000	188,8	205	115,2	240	204	204
Color Aparente	St. Mth 2120 C	Pt-Co	Máx. 15	104	78	80,7	65	63,1	18,6
Turbidez	St. Mth 2130 B	NTU	Máx. 2	13,1	18,2	114	42	58	156
Alcalinidad Total	St. Mth 2320 B	mg CaCO3/L	Máx. 200	64,8	67,6	63	74	63,5	61,1
Dureza Total	St. Mth 2340 C	mg CaCO3/L	Máx. 300	88,4	84,4	95,6	90,9	87,4	105
Dureza Cálctica	St. Mth 3500 CaD	mg CaCO3/L	-	71,6	72	85,9	30,7	72,9	74,8
Dureza Magnésica	St. Mth 3500 MgE	mg CaCO3/L	-	16,8	12,4	9,7	14,4	13,2	10,8
Cloruros	St. Mth 4500-Cl-B	mg Cl/L	Máx. 250	5,5	5,6	2,9	4	3,6	3
Calcio	St. Mth 3500 CaD	mg Ca/L	Máx. 60	28,7	28,9	34,4	30,7	31,5	30
Sulfatos	St. Mth 4500 SO4E	mg SO4/L	Máx. 250	29,6	18,8	20,4	28,2	10	16,2
Hierro Total	St. Mth 3111 B	mg Fe/L	Máx. 0,3	0,2	0,05	0,47	0,269	0,215	0,234
Nitritos	St. Mth 4500 NO2B	mg NO2/L	Máx. 0,1	0,005	0,016	0,012	0,033	0,021	0,653
Sólidos Suspendidos	Potenciometrico	mg/L	-	112,9	117,9	127	99,6	78,2	124
Cloro residual	St. Mth 4500 Cl G	mg/L	-	-	-	0,03	0,21	0,46	0,47
Coliformes totales	St. Mth 9222 B	UFC/100 mL	Máx 100 (salida)	230	250	240	43	110	240
Nitratos	J.R.Caron Bacquet	mg NO3-N/L	Máx.10	-	-	2,8	0,4	0,4	3,9
Manganeso	St. Mth 3111 B	mg Mg/L	Máx 0,1	-	-	0,023	0,155	0,092	0,076
Ortofosfatos	St. Mth 4500 PE	mg PO4-3/L		-	-	0,063	0,153	0,153	0,27

Fuente: Autor

Tabla 42. Caracterización de Agua a la Salida de la de Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP).

Variable	Método	Unidad	Valor Referencia	Resultado Salida a la PTAP					
				Enero	Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Marzo
pH	St. Mth 4500 H+B	pH	6,5 - 9,0	723	7,53	7,82	7,06	7,24	6,95
Conductividad a 25°C	St. Mth 2510 B	us/cm	Hasta 1000	202	212	112,9	150,9	141,9	143,6
Color Aparente	St. Mth 2120 C	Pt-Co	Máx. 15	31	5,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Turbidez	St. Mth 2130 B	NTU	Máx. 2	3,07	1,08	1,8	1,8	1,8	1,8
Alcalinidad Total	St. Mth 2320 B	mg CaCO3/L	Máx. 200	58,4	63,8	55,6	43,4	39,9	41,9
Dureza Total	St. Mth 2340 C	mg CaCO3/L	Máx. 300	82,6	83,4	83,1	50,1	52,5	59,6
Dureza Cálctica	St. Mth 3500 CaD	mg CaCO3/L	-	73,6	72,4	75,1	16,2	42,6	48,1
Dureza Magnésica	St. Mth 3500 MgE	mg CaCO3/L	-	9,2	11,4	8	9,7	9,6	8,1
Cloruros	St. Mth 4500-Cl-B	mg Cl/L	Máx. 250	13,6	10,5	8,4	8	6,7	16
Calcio	St. Mth 3500 CaD	mg Ca/L	Máx. 60	29,4	29	30,1	16,2	18,1	19,3
Sulfatos	St. Mth 4500 SO4E	mg SO4/L	Máx. 250	26,8	14,85	23,5	17,7	11,1	16
Hierro Total	St. Mth 3111 B	mg Fe/L	Máx. 0,3	0,05	0,05	0,095	0,095	0,095	0,095
Nitritos	St. Mth 4500 NO2B	mg NO2/L	Máx. 0,1	0,005	0,016	0,008	0,051	0,048	0,008
Sólidos Suspendidos	Potenciometrico	mg/L	-	125,2	121,8	123	70	59,8	61,5
Cloro residual	St. Mth 4500 Cl G	mg/L	-	1,16	1,31	0,69	1,06	0,66	1,08
Coliformes totales	St. Mth 9222 B	UFC/100 mL	Máx 100 (salida)	0	0	0	0	0	0
Nitratos	J.R.Caron Bacquet	mg NO3-N/L	Máx.10	-	0,016	2,1	0,4	0,4	0,4
Manganeso	St. Mth 3111 B	mg Mg/L	Máx 0,1	-	-	0,023	0,023	0,023	0,023
Ortofosfatos	St. Mth 4500 PE	mg PO4-3/L		-	-	0,03	0,153	0,153	0,153

Fuente: Autor

Tabla 43. Caracterización de Agua a la Entrada de la de Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (PTARD).

Variable	Método	Unidad	Resultado Entrada a la PTAR						
			Enero	Febrero	Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Marzo
Caudal		(L/s)	0,76	0,78	0,976	1,2153	1,138	0,936	0,658
pH	St. Mth 4500 H+B	pH	7,22	7,44	7,47	7,45	7,33	7,31	7,07
Grasas y aceites	St. Mth 5520 B	mg/L	125	42,9	33,2	67,9	27,3	58,3	101
Coliformes totales	St. Mth 9222 B	UFC/100 ml	7,84E+05	9,60E+07	3,36E+07	2,40E+05	2,40E+05	2,40E+05	2,40E+05
E-coli	St. Mth 9222 B	UFC/100 ml	3,36E+05	6,00E+07	2,20E+07	110000	24000	24000	24000
Sólidos Suspendidos T	St. Mth 2540 B	mg/L	158	168	139	135	40	87,5	105
Demanda Química Oxígeno	St. Mth 5220 C	mg O2/L	717	679	322	548	116	276	156
Demanda Bioquímica Oxígeno	St. Mth 5210 B	mg O2/L	444	409	199	322	68,3	95,2	90,6
Tensoactivos	St. Mth 5540 C	mg/L	15,6	16,4	9,5	7,4	0,21	0,415	0,178
Fósforo Total	St. Mth 4500 PE	mgP/L	-	-	-	-	-	1,8	2,1
Nitrógeno	St. Mth 4500 NC	mgN/L	-	-	-	-	-	23,4	0,779

Fuente: Autor

Tabla 44. Caracterización de Agua a la Salida de la de Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (PTARD).

Variable	Método	Unidad	Resultado Salida a la PTAR						
			Enero	Febrero	Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Marzo
Caudal		(L/s)	0,68	0,68	0,6	0,73	1,095	0,911	0,658
pH	St. Mth 4500 H+B	pH	7,31	7,27	7,17	7,61	7,41	6,99	7,08
Grasas y aceites	St. Mth 5520 B	mg/L	<10	<10	<15	<3	9,7	9,1	8,9
Coliformes totales	St. Mth 9222 B	UFC/100 ml	1,12E+05	7,20E+07	7,00E+06	>24000	>24000	4,80E+04	3,00E+00
E-coli	St. Mth 9222 B	UFC/100 ml	5,00E+03	3,60E+07	3,40E+06	<3	>24000	22000	3
Sólidos Suspendidos T	St. Mth 2540 B	mg/L	48	38	24,3	14,2	7	5,6	0,1
Demanda Química Oxígeno	St. Mth 5220 C	mg O2/L	177	169	99,6	28,4	22,7	91,2	17,4
Demanda Bioquímica Oxígeno	St. Mth 5210 B	mg O2/L	92,1	83,4	44,6	15,9	13,2	11,1	30
Tensoactivos	St. Mth 5540 C	mg/L	6,6	9,2	5,1	0,051	0,07	0,081	0,025
Fósforo Total	St. Mth 4500 PE	mgP/L	-	-	-	-	-	1,2	2,4
Nitrógeno	St. Mth 4500 NC	mgN/L	-	-	-	-	-	15,8	2,6

Fuente: Autor

Tabla 45. Equipos utilizados en la Plana de Tratamiento de Agua Potable.

Equipo/material	Descripción	Unidad
Válvula solenoide	Material bronce, diámetro 1 1/2 "; operación eléctrica 110 voltios	1
Dosificador Químicos	Marca Blue White; 100 PSI; capacidad de 2.4 gph	7
Dosificador Químicos	Marca Blue White; 100 PSI; capacidad de 9.6 gph	1
Tanque de Oxidación Agua río	Capacidad 15 m3; altura 2.65 m; diámetro 2.5m; material en fibra de vidrio	1
Tanque de almacenamiento agua cruda	Capacidad 15 m3; altura 2.65 m; diámetro 2.5m; material en fibra de vidrio	1
Tanque Oxidación agua pozo	Capacidad 7 m3; altura 4 m; diámetro 1.5m; material en fibra de vidrio	1
Bombeo al floculador	Bomba autocebante de Barnes; motor 1 HP EVANS a 220 v	1
FSML (floculador sedimentador manto de lodos)	Altura de 4.2 m; diámetro de 2.0 m; material PRFV (plástico reforzado fibra vidrio), cauda de diseño 1.0 l/s	1
Unidad Filtración	Diámetro 54"; altura 2.70 m; diámetro 3".	1
Gravas y arenas	Material libre de Mg, Fe y MO. Cuazo 98% pureza. Tamaños desde 1/2 " a 2 1/2 ".	Sin Especificar
Antracita	T.E. 0.50 mm; C.U. 1.45 mm	Sin Especificar
Arena	T.E. 0.50 mm; C.U. 1.45 mm	Sin Especificar
Carbón Activado	Densidad 0.5-0.54; dureza 99%; área superficial 1000-1100; temp ignición 400°C.	Sin Especificar

Fuente: Campamento El Cedral

Tabla 46. Equipos utilizados en la Plana de Tratamiento de Agua Residual.

Equipo/material	Descripción	Unidad
Pozo de succión	Bomba Pedrollo ZXm1A; hierro fundido y acero inoxidable; 230 V; 4.5A; 0,60 kW y 0.85 HP	3
Homogenizador	Reactor; poliéster reforzado de fibra de vidrio (PRFV); Vol:15m3;	1
Reactor	ECOPAC; Volumen: 18m3; procesa 33,5m3 agua; pantallas de material sintético polimerizado	2
Clarificador	Volumen de 6m3; de flujo ascendente con panel de sedimentación tipo colmena (Angulo 60°)	1
Tablero Eléctrico	Control y automatización de todos los equipos y bombas. Cumple con la norma RETIE	1
Bombas	succión; homogenización; aireación, reacción (4); Dosificación; descarga	9

Fuente: Campamento El Cedral

Anexo F. Inventario de Análisis de Ciclo de Vida

Tabla 47. Caracterización de Agua de Pozo

Sustancia	Compartimento	Unidad	PTAP Ozono	Distribución	PTARd	Total
Aluminum hydroxide	Crudo	g	25	x	x	25
Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	Crudo	g	147,68519	427,3236	16,702698	591,71148
Energy, from hydro power	Crudo	MJ	55,903432	161,75526	6,3224903	223,98118
Energy, kinetic (in wind), converted	Crudo	kJ	83,437958	241,42576	9,4365527	334,30027
Gas, natural, 30.3 MJ per kg, in ground	Crudo	kg	0,75928542	2,1969744	0,08587263	3,0421325
Occupation, water bodies, artificial	Crudo	m2a	0,52332287	1,5142224	0,05918606	2,0967313
Oxygen, in air	Crudo	g	1,1638873	x	x	1,1638873
Sodium hydroxide	Crudo	g	6	x	x	6
Transformation, to unknown	Crudo	cm2	34,209563	98,984562	3,8689866	137,06311
Transformation, to water bodies, artificial	Crudo	cm2	34,209563	98,984562	3,8689866	137,06311
Water, river	Crudo	m3	6,2851738	x	6,6652755	12,950449
Carbon dioxide	Aire	kg	2,3779309	6,803378	0,26592206	9,447231
Carbon dioxide, land transformation	Aire	kg	1,5556173	4,5011419	0,17593509	6,2326943
Carbon monoxide	Aire	g	9,6788031	28,005388	1,0946401	38,778832
Dinitrogen monoxide	Aire	mg	115,14438	333,16755	13,022443	461,33438
Heat, waste	Aire	kJ	43,818683	98,984562	3,8689866	146,67223
Hydrocarbons, unspecified	Aire	g	2,5365139	7,3393432	0,2868712	10,162728
Methane, biogenic	Aire	kg	0,25448577	0,73634857	0,02878149	1,0196158
Methane, fossil	Aire	mg	6,40608	x	x	6,40608
Nitrogen oxides	Aire	kg	0,73395103	2,123581	0,08300392	2,9405359
Ozone	Aire	g	1,1638873	x	x	1,1638873
Particulates, < 2.5 um	Aire	mg	1,921824	x	x	1,921824
Particulates, SPM	Aire	g	186,06665	538,37945	21,043513	745,48961
Soot	Aire	g	1,2999634	3,7614134	0,14702149	5,2083982
Sulfur dioxide	Aire	mg	12,81216	x	x	12,81216
Sulfur oxides	Aire	g	243,15102	703,51467	27,498115	974,16381
Acids, unspecified	Agua	g	X	103,208	x	103,208
Acrylamide	Agua	mg	100,03981	x	x	100,03981
Alcohol ethoxylate	Agua	g	X	251,94	x	251,94
Allyl alcohol	Agua	g	X	54,186	x	54,186
Aluminum	Agua	g	11,208915	x	x	11,208915
Aluminum oxide, fibrous forms	Agua	g	12,5	x	x	12,5
Ammonia	Agua	g	X	63,217	x	63,217
Ammonium, ion	Agua	g	X	90,307	x	90,307
BOD5, Biological Oxygen Demand	Agua	kg	10,860859	x	1146,0451	1156,906
Calcium compounds, unspecified	Agua	kg	77,87721	x	5,2016E-05	77,877262

Sustancia	Compartimento	Unidad	PTAP Ozono	Distribución	PTARd	Total
Carbonate	Agua	ton	1,0837572	x	x	1,0837572
Chloride	Agua	kg	41,701035	x	x	41,701035
Chlorine	Agua	g	12,609449	x	0,0520155	12,661465
COD, Chemical Oxygen Demand	Agua	kg	33,441867	x	2013,468	2046,9099
Cyanide	Agua	g	30,383906	x	x	30,383906
Fatty acids as C	Agua	kg	X	x	315,94199	315,94199
Glycol ethers	Agua	g	X	61,371	x	61,371
Hydrazine sulfate	Agua	kg	94,107686	x	x	94,107686
Hydrogen peroxide	Agua	g	5,33	157,76	x	163,09
Iron	Agua	kg	1,1318388	x	x	1,1318388
Manganese	Agua	g	30,383906	x	x	30,383906
Nitrate	Agua	kg	13,452276	x	x	13,452276
Nitrite	Agua	g	30,383906	x	x	30,383906
Nitrogen, total	Agua	kg	0,9512033	x	74,483408	75,434612
Organic carbon	Agua	g	5,0053937	x	x	5,0053937
Ozone	Agua	kg	15,653054	x	x	15,653054
Phosphate	Agua	kg	1,4506328	x	x	1,4506328
Phosphorus, total	Agua	kg	X	x	12,68069	12,68069
Phthalate, butyl-benzyl-	Agua	g	X	47,733	x	47,733
Sodium, ion	Agua	g	6	72,248	x	78,248
Solids, inorganic	Agua	kg	5301,4053	x	12,595818	5314,0012
Sulfate	Agua	kg	76,697206	x	x	76,697206
Sulfuric acid	Agua	g	12,5	x	x	12,5
Suspended solids, inorganic	Agua	kg	91,395121	x	583,05055	674,44567
Suspended solids, unspecified	Agua	kg	499,83681	x	0,12294481	499,95976
Trichlorosilane	Agua	g	X	81,279	x	81,279
Waste, final, inert	Desecho	g	14,093376	x	x	14,093376
Cadmium	Suelo	µg	208,27819	x	301,33531	509,6135
Calcium	Suelo	g	X	x	3,3327685	3,3327685
Chromium	Suelo	mg	2,0827819	x	x	2,0827819
Copper	Suelo	mg	0,41655637	x	0,60267062	1,019227
Iron	Suelo	mg	5,4152329	x	x	5,4152329
Lead	Suelo	mg	2,0827819	x	3,0133531	5,096135
Phosphorus	Suelo	mg	X	x	922,08605	922,08605
Zinc	Suelo	mg	1,0413909	x	0,15066766	1,1920586

Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método CML 2001 v2.04.

Anexo G. Tecnologías para la Reutilización de agua residual.

Tabla 48. Relación de Tecnologías para el Re-uso de agua residual.

Tipo		Tecnología	Tratamiento de regeneración		Utilizado para	Fiabilidad	Coste		Notas
			Pretratam	Desinfección			Construcción	Gestión	
Extensivo/ Natural	Biomasa fijada	IP (Infiltración-Percolación)	++	+++	Terciario, agricultura, Sin desinfección adicional	+++	**	**	1
		IPS (IP Subterránea)	++	+++	Terciario, agricultura, Sin desinfección adicional	+++	**	**	1
		Zona húmeda construida	++	++	Muy buena integración ambiental y paisajística	+++	**	**	2
	Biomasa libre	Estanques (lagunaje)	+	+++	Pequeñas comunidades con suficiente espacio disponible	+++	**	**	3
Intensivo / Duro	Modificaciones de los lodos activados	SBR	++	+	Cargas variables. Carga orgánica elevada	++	+++	**	
		RBC	++	+	Pequeñas comunidades	++	+++	****	
		MBRs	++	+++	Comunidades pequeñas o medianas	++	+++	***	
	Químicos	Ozono	++++	+++	Desinfección, descomposición de la materia orgánica. Los virus son sensibles	++	****	***	4
		APA	++++	++	Desinfección en grandes depuradoras	+++	*	*	
		ClO ₂	++++	++	Desinfección. Menos subproductos que el cloro	+++	*	*	
Físicos	Físicos	Filtro de Anillas	+++	+	Terciario. Gran eliminación de SS	++	+++	+++	
		UV	++++	+++	Sin reactivos, sin subproductos. Útil en todos los sistemas (dimensión)	+++	*	*	
		Físico-químico	+++	+	Adecuado para medianas y grandes instalaciones. Elimina DBO y SS	++	+++	****	
		Sonicación	++++	++++	Degradación de contaminantes. Desinfección en estudio	+++	-	-	I
	Tecnologías de membrana	MF	+++++	+++	Eliminar contaminantes de más de 0,1-1 µm	+++	**	**	N
		UF	+++++	++++	Eliminar contaminantes de más de 0,01-0,1 µm	+++	**	**	N
		NF	+++++	++++	Eliminar contaminantes de más de 0,001-0,01 µm	+++	+++	+++	N+I
		OI	+++++	TOTAL	Eliminar contaminantes de más de 0,001 µm	+++	****	****	N+II
		EDR	+++++	NA	Eliminación de sales	+++	**	**	
		EDI	+++++	NA	Eliminación de sales	+++	-	-	I

Fuente: (CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO - CYTED, 2014).

