

---

---

## EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA APLICADO A LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

---

---

The life-cycle assessment applied to plants wastewater treatment

**Juan Pablo Rodríguez Miranda**<sup>\*</sup>  
**César Augusto García Ubaque**<sup>\*\*</sup>  
**Carlos Alfonso Zafra Mejía**<sup>\*\*\*</sup>

**Resumen:** Este artículo considera la aplicación del análisis del ciclo de vida como técnica alternativa de gestión ambiental en las plantas de tratamiento de aguas residuales, identificando los recursos usados y los generados los que son emitidos a vectores ambientales (agua, aire y suelo) a lo largo de todo el ciclo de vida de un bien o un servicio específico, como una opción válida para la estimación y/o valoración de los impactos o consecuencias ambientales que puedan generar en las fases de prefactibilidad y factibilidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

**Palabras clave:** Análisis de ciclo de vida, aguas residuales, impacto ambiental.

---

\* Profesor asociado. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: jprodriguez@udistrital.edu.co.

\*\* Ingeniero Civil. Magíster en Ingeniería Civil. Doctor en Ingeniería. Profesor asociado, Facultad de Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: cagarcaiu@udistrital.edu.co.

\*\*\* Ingeniero Civil. Doctor en Ingeniería Civil. Profesor asociado, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Correo electrónico: czafra@udistrital.edu.co.

**Abstract:** This paper considers the application of life-cycle assessment as an alternative technique for environmental management in plants wastewater treatment, identifying the resources used and those generated which are issued environmental vectors (water, air and soil) along the entire life cycle of a product or a specific service, such as a valid option for estimating and/or assessment of environmental impacts or consequences that may generate in the stages of planning and construction of treatment plants wastewater.

**Keywords:** Life-cycle assessment, wastewater, environmental impact.

## 1. Introducción

En un sistema, donde se tenga un enfoque sistémico, de entradas, salidas y un impacto ambiental potencial, el análisis del ciclo de vida (ACV, de ahora en adelante) puede ayudar a tomar decisiones y a comprender el desempeño ambiental de una tecnología o producto en condiciones especiales de desarrollo e inclusive para identificar puntos críticos de sostenibilidad (Liu, 2016; Capitanescu, 2016). La aplicación del ACV en una planta de tratamiento de aguas residuales es una gestión ambiental específica, para establecer las emisiones ambientales de los procesos y operaciones involucradas para la descontaminación del agua y luego convertirlos en indicadores ambientales en la línea de agua, biogás y sólidos, conociendo así su desempeño ambiental global y posteriormente analizarlos en el conjunto con el ambiente adyacente desde un ámbito de producción de agua residual tratada, uso y eliminación de un producto dentro de la planta de tratamiento (Lorenzo, 2016; Morrison, 2016; Gallego, 2008). Por ello, este artículo, tiene como propósito realizar una revisión de los aspectos

de aplicación de una técnica alternativa de gestión ambiental aplicada a las plantas de tratamiento de aguas residuales como lo es el análisis del ciclo de vida, con un enfoque más amplio que el comúnmente aplicado, como el de impacto ambiental desarrollado exclusivamente en la etapa de prefactibilidad y factibilidad de los proyectos.

## **2. Materiales y métodos**

La investigación aplicada fue de tipo exploratoria, debido a que se indagó sobre el tema del análisis del ciclo de vida y su relación con las plantas de tratamiento de aguas residuales, y por tanto se pudo precisar, identificar y delimitar aspectos de comprensión, sinergias y delimitación del tema analizado (Hurtado, 2000). Además según el tiempo de ocurrencia de los hechos y el registro de la información relacionada con el tema de estudio, el tipo de investigación aplicada también fue considerada como retrospectiva, porque permitió alcanzar conocimientos fundamentales del tema (Vergel, 2010). La fuente de información para el desarrollo de este trabajo, fue la revisión de la literatura especializada, en bases de datos específicas, y los proyectos elaborados en la temática de análisis de ciclo de vida.

## **3. Desarrollo**

### **SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL**

La gestión ambiental enfocada a los sistemas de producción o productos tiene propósitos en la minimización de impactos ambientales en el proceso mismo de producción, pero con un enfoque claro del manejo del ciclo de vida del producto, en muchos casos delimitando el ciclo de vida (materias primas, proveedores, procesos, productos, emisiones y residuos) y adaptando decisiones y metas estratégicas. De manera general, se centra en los sistemas de producción o productos, en su mayoría de veces a solucionar

problemas y temas ambientales inmediatos y de corto plazo, esto debido, por la racionalidad de la inversión en costos ambientales o la no inversión en ellos, falta de dirección estratégica en temas ambientales y la concepción equívoca de intervenir problemas ambientales conocidos o previstos de manera puntual y no como un sistema de gestión ambiental (Harrison, 1996). Por ello, pueden presentarse etapas de maduración de la gestión ambiental, que pueden ser del tipo reactivo (resistencia a cumplir con la normatividad ambiental hasta ser obligado), responsable (se centra en el pasado con la información ambiental y luego se da una visión retrospectiva del sistema con relación al cumplimiento con la normatividad ambiental), proactivo (gestiona los temas ambientales, inclusive algunos no regulados) y competitivo (administra los aspectos ambientales con un enfoque competitivo), es decir, lo anterior expone un cambio de enfoque tradicional de la gestión ambiental y desde luego la manera de aplicación. Además, pueden existir diferentes alternativas para la gestión ambiental aplicada a sistemas de producción o productos, consideradas a largo o mediano o corto plazo según el plan estratégico adoptado, pero son de interesante aplicación para la toma de decisiones según el conocimiento y la información que se tenga del proceso, actividad, proyecto o servicios.

Dentro de las alternativas de gestión ambiental se pueden mencionar:

- a) El análisis de riesgos ambientales (*risk assessment*), el cual puede evaluar riesgos ecológicos e impactos reales, ocasionados por fuentes puntuales o difusas de contaminantes, analizando cualitativamente y con criterios de probabilidad los riesgos que puedan resultar de situaciones adversas.
- b) El estudio de impacto ambiental (*environmental impact assessment*), el cual es utilizado para estimar cambios ambientales en un proyecto específico, considerando los efectos ambientales antes, durante y después del proyecto, el cual es susceptible

de una licencia ambiental, también puede ser una herramienta útil en la toma de decisiones con respecto a las inversiones en infraestructura, porque reducen los costos ambientales y contribuyen positivamente al desarrollo sostenible (CAF, 2009).

- c) La auditoría ambiental (*environmental auditing*), la cual es un proceso sistemático, objetivamente documentado para verificar y evaluar evidencias y determinar específicamente qué aspectos ambientales, eventos, condiciones, sistemas de gestión o informaciones, están conformes con los criterios previamente definidos.
- d) La evaluación del comportamiento ambiental (*environmental performance evaluation*), el cual es una auditoría interna que se basa en indicadores para medir, evaluar y verificar el comportamiento ambiental, para una gama de actividades de la organización.
- e) El análisis del flujo de sustancia (*substance flow analysis*), el cual se utiliza para un balance de flujo de determinada sustancia a lo largo del ciclo de vida en el sistema, incluyendo la producción y el uso del mismo, para mejorar la calidad ambiental a través de medidas de control y reducción.
- f) El análisis de material y energía (*energy and material analysis*) es el precursor del análisis del ciclo de vida, pero se diferencia en que utiliza algoritmos para cuantificar todos los materiales y energías que entran y salen del sistema en estudio, para ser evaluado en cierta etapa o fase del ciclo de vida de un producto, para tener una interpretación del impacto en el ambiente causado por ciertas emisiones.
- g) La gestión integral de sustancia (*integrated substance chain management*) es el precursor del análisis del ciclo de vida simplificado, el cual consiste en comparar diferentes opciones con respecto a ciertas mejoras ambientales o económicas de un sistema.

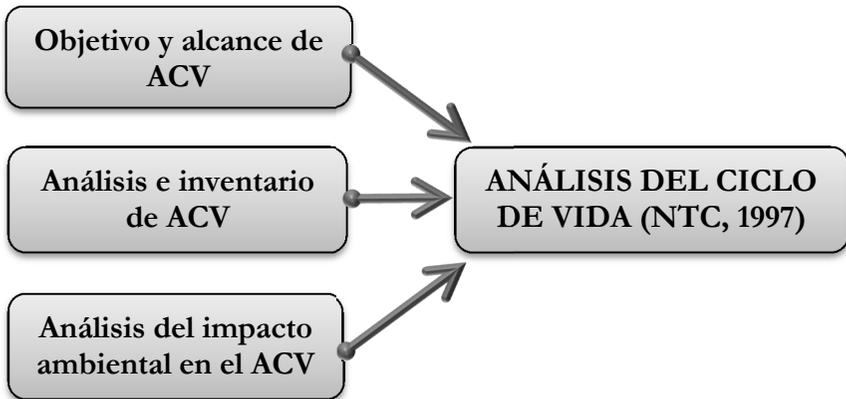
- h) El análisis de línea de producto (*product line analysis*) es muy similar al análisis del ciclo de vida, pero presentando un espectro más amplio de análisis, dado que incorpora aspectos económicos y sociales; esta herramienta es conceptualmente correcta pero poco práctica.
- i) El análisis del ciclo de vida (*life cycle assessment*), la cual identifica los recursos usados y los generados que son emitidos a vectores ambientales (agua, aire y suelo) a lo largo de todo el ciclo de vida de un bien o un servicio específico. (De Carvalho, 2001).

## ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

El análisis o evaluación del ciclo de vida (ACV) es una técnica para evaluar los aspectos ambientales, tratamiento ambiental y los impactos ambientales potenciales asociados con un producto o materiales, a largo de la vida del producto o materiales, y esta técnica ayuda a identificar oportunidades para mejorar los aspectos ambientales, toma de decisiones (marco objetivo y científicamente robusto) y la selección de indicadores de desempeño ambiental (NTC, 1997). Por ello, el ACV tiene como objetivo (figura N.º 1), entender el perfil ambiental de un sistema para identificar y asegurar la prioridad de mejoras (De Carvalho, 2001), así como asegurar un criterio racional para decidir dónde invertir los recursos de la manera más inequívoca para el ambiente, es decir, dónde concentrar los recursos limitados para minimizar los impactos ambientales que se puedan generar a gran escala (Kiely, 1999). El ACV ha tenido una evolución desde los años 60, la cual ha sido desarrollada para diferentes disciplinas (Corominas, 2013) y se ha implementado en la prevención de la contaminación, teniendo como objetivo el promover el desarrollo sustentable a escalas globales, regionales e inclusive locales (Keoleian, 1988). El ACV se puede utilizar para comparar alternativas o estimar el efecto potencial que se pueda tener en el cambio de producto, y cómo se podría mejorar para disminuir la consecuencia ambiental

a escala global o regional (Benveniste, 2011), es decir que el ACV no compara productos entre sí, sino servicios o cantidades de productos que lleven a cabo la misma función. De manera general una fortaleza que tiene el ACV es que considera impactos globales y regionales, y posibilita el estimar impactos que tengan influencia en la salud y la sociedad; mientras que dentro de sus debilidades, se encuentra que no es capaz de analizar el carácter temporal o espacial de un determinado efecto (De Carvalho, 2001). El ACV presente esencialmente dos tipos de metodologías, la primera basada en el proceso convencional del análisis energético y los flujos de materiales según el proceso de fabricación, y la segunda, basada en el *input – output* que vincula datos ambientales del proceso a analizar, siendo esta última la más utilizada en los estudios (Zhang et al, 2010). La evolución del ACV ha pasado de los productos y materiales, al análisis de sistemas productivos como las Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y su influencia en el medio (Deusto Tech, 2012).

**Figura N.º 1**  
**Esquema conceptual del ACV**



Fuente: Elaboración propia

## ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA APLICADO A LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El ACV en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) convencionales es una herramienta buena para la estimación y/o valoración de los impactos o consecuencias ambientales que puedan generar en las fases de planeación y construcción de las PTAR (Wang, 2012). Los primeros estudios de aplicación de ACV en PTAR convencional fueron en los años 90 (Corominas, 2013), los cuales fueron utilizados para evaluar la sostenibilidad del tratamiento de aguas residuales en Holanda ((*Deusto Tech*, 2012), (Rodríguez, 2011)) y su aplicación fue a nivel regional y no nacional, por ello, el análisis de las PTAR debe hacerse de manera separada, dado que las tecnologías y capacidades pueden ser diferentes entre sí, e inclusive en el medio receptor de sus efluentes tratados. Aunque el ACV en su aplicación genérica, puede ser una descripción alejada de los impactos reales de la PTAR con su medio, si la categoría de impactos no están completamente justificados y ajustados al contexto regional o local (Corominas, 2013). La estimación de las emisiones durante la operación de la PTAR puede ser más significativa que durante la construcción, lo cual conlleva a la necesidad de una prevención de la contaminación integrada y de un control exhaustivo para identificar las posibles fuentes de emisiones hacia el ambiente en la operación misma (Kiely, 1999).

Se han realizado estudios de ACV por el número de habitantes servidos por la PTAR y algunos estudios indican que puede haber una segregación con poblaciones menores a 30,000 habitantes; esto se ha hecho con el propósito de comparar las tecnologías, la calidad de las aguas tratadas, las optimizaciones, la disminución de la carga de nitrógeno total y fósforo total y la capacidad de la PTAR (*Deusto Tech*, 2012). Actualmente se realizan ACV para PTAR, para la comparación de tecnologías y la influencia del consumo de energía (Foley et al., 2010), y el reúso del agua residual (Corominas, 2013). Debido a la naturaleza de la ACV, en el ámbito de aspectos

ambientales puede ser extensa, por ello, debe delimitarse el análisis según factores como las hipótesis, la disponibilidad de datos, limitaciones económicas, técnicas, el tipo de aplicación y el destinatario previsto (Guerega, 2006).

Un elemento en la cronología es el aplicar la ACV de manera regional, dado que los hábitos alimenticios, la actividad antrópica, altura sobre el nivel del mar, elementos físicos y geográficos, pueden ser un elemento homogeneizador en el análisis de las PTAR convencionales. Se han evaluado PTAR pero con tecnologías similares, por ejemplo, con lodos activados en regiones como Tarragona, Baix Llobregat, Compostela, en España, donde el conjunto de habitantes servidos superan los 2 millones de habitantes (*Densito Tech*, 2012). Desde luego el ACV en PTAR debe ser desde un punto de vista integral detallado, en donde el análisis de la línea de aguas, lodos y biogás estén bien descritos, para conocer la influencia de estos en el medio, al momento de la operación de la PTAR y alcanzar los límites de descarga de su efluente tratado.

Al aplicar el ACV para evaluar la sostenibilidad en un sistema de tratamiento de lodos activados según varias PTAR de los países bajos, se han tomado en cuenta factores como las emisiones de CO<sub>2</sub> (en tecnologías aerobias de PTAR se generan 0.228 a 0.438 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de agua residual (Bani, 2010)), como dependencia de la producción del agua potable, remoción de contaminantes, consumo eléctrico, uso de productos químicos, construcción, demolición, emisiones de gases efecto invernadero (GEI), operación, mantenimiento, entre otros aspectos. Se demostró que el factor de consumo de energía (típicamente la aireación consume aproximadamente el 50% de energía del total de la PTAR; el tratamiento de lodos aproximadamente el 30% y la elevación de la cabeza hidráulica o bombeo aproximadamente el 15% (Zhou, 2013)), como contribuyente del agotamiento de los recursos naturales, fue muy bajo y otros factores como la construcción y el uso de productos químicos no fueron significativos en la evaluación con ACV (Corominas, 2013).

Según lo dicho anteriormente, el ACV ha servido para caracterizar impactos ambientales de las PTAR convencionales y su sostenibilidad, aun aplicando modelos de simulación para la tecnología de lodos activados. También se han logrado estrategias para el control de nutrientes contaminantes tales como el nitrógeno y el fósforo; el ACV ha servido para comparar diferentes tecnologías en la PTAR convencionales y mejorar sus eficiencias de remoción de contaminantes (generalmente realizado para materia orgánica biodegradable o  $\text{DBO}_5$  durante la operación de la PTAR (Pognani, 2012)), para establecer la toxicidad, el impacto de emisiones de GEI ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  (puede ser emitido de 11 a 310 g  $\text{CH}_4$ /hab año (Daelman, 2012)),  $\text{N}_2\text{O}$ , los cuales pueden ser generados durante la operación en las PTAR convencionales (Bani, 2010). Y, en especial, sirve para el análisis de cuando la tecnología presenta la nitrificación y denitrificación, debido al exceso de nitrógeno en el efluente (Ashrafi, 2013); para obtener el mejor costo de tratamiento regional y sus efectos ambientales generados de la actividad. Se han considerado conclusiones que las PTAR tienen mayor incidencia ambiental en la construcción que en la operación (Corominas, 2013).

Hay que anotar que en muchos ACV, no se tiene en cuenta la recolección del agua residual, el bombeo (elevación de la cabeza hidráulica), así como los colectores ni los interceptores; varias aplicaciones de ACV indican, que la construcción de la PTAR, como el sistema de recolección de aguas residuales, le aportan en un 0.5% de la carga ambiental total del sistema, al igual que tiempo de vida útil (insignificante en el ACV). De modo que muchos ACV en sus análisis, excluyen la fase de la construcción de la PTAR y solo se enfocan en la operación de la PTAR (no mantenimiento ni desmantelamiento, ni línea de olores), dado que el interés principal es el efecto ambiental de la PTAR con la cuenca hídrica y su medio (Deusto Tech, 2012).

También se ha utilizado el ACV en las PTAR convencionales, para cambiar su localización en un escenario de simulación, en la

reducción en la fuente de elementos contaminadores (materia orgánica y nutrientes), separar aguas residuales e industriales y lluvias de los sistemas combinados, lo cual presentó mejores resultados en la emisión de GEI y en muchos estudios. Se ha recomendado la implementación de un tratamiento terciario para la remoción de nutrientes (Corominas, 2013). En otros estudios de ACV en PTAR, se han utilizado para la planificación y selección de la PTAR, incluyendo la variable ambiental en el diseño de la PTAR, dado que el ACV es una herramienta de toma de decisión para la disminución de impactos ambientales, y por eso, se incluye en el proceso de diseño de ingeniería de la PTAR (Machado, 2007). Algunas aplicaciones de ACV en PTAR, establecen que los impactos ambientales generados en la PTAR, como eutrofización y calentamiento global, son los factores más costosos y significativos. Por lo tanto, al reducir la utilización de combustibles por energías renovables (energía eólica), reduce los contaminantes del aire (Xiaoyong, 2013).

En las PTAR y su gestión de los lodos generados, al aplicar el ACV, se obtuvieron resultados al comparar las diferentes opciones de tratamiento (digestión anaerobia, proceso térmico, estabilización con cal, lecho de secado, pirolisis, incineración, transporte a un relleno sanitario, compostaje, etc.), se establece que la deshidratación es la mejor opción con menos impactos ambientales (Corominas, 2013), aunque el análisis, en muchos casos, es sesgado porque varían dependiendo del país de origen, si es considerado como un residuo o recurso, si es un pos producto o sub producto, si la recuperación es en el sitio o fuera de la PTAR, y en algunos casos han utilizado datos a escala de laboratorio, los cuales son diferentes a escala real (Mills et al., 2014).

La unidad funcional (cantidad de productos o servicios necesarios para cumplir la función que se compara, sirve de base para la comparación entre sistemas y a partir de ella se cuantifica las entradas y salidas funcionales de un sistema (Guerega, 2006)) más empleada en los ACV en PTAR convencionales es el caudal de

aguas residuales generado ( $m^3/s$ ) (Corominas, 2013), pero de manera más específica, esta unidad funcional no es representativa o descriptiva de la calidad del agua residual cruda (afluente) y tratada (efluente) y desde luego de la eficiencia de la PTAR (*Densito Tech*, 2012), lo cual impide comparar varias PTAR. En otros casos, se ha utilizado en el ACV, la unidad funcional del aporte per cápita ( $gr/Hab$  día) (Corominas, 2013) es de mencionar que esta unidad funcional, solo sería para un solo contaminante, por ejemplo,  $DBO_5$  o SST o N o P, pero dejaría por fuera el conjunto de parámetros de calidad del agua representativo de las PTAR. Otros análisis de ACV, han propuesto el análisis mediante el beneficio de aprovechamiento ambiental de la PTAR (Corominas, 2013), que se refiere al análisis ambiental de la PTAR en la condición de operación adecuada y no adecuada, pero es solo un enfoque de evaluación ambiental puntual.

También se han presentado estudios de ACV, donde la unidad funcional es el tiempo de vida de la PTAR (Corominas, 2013) el cual ha sido limitado en algunas ocasiones a 15 años y en otros a 10 años, pero esta unidad funcional está relacionada con la reposición de equipos electromecánicos, pero en el análisis de una PTAR que trabaje a gravedad, esta unidad funcional queda sin solidez de análisis. También es de mencionar que otras unidades funcionales, puede ser kWh al utilizar energía eléctrica en la PTAR; kg para la descarga de DBO, N y P en PTAR; g para descarga de selectiva de metales pesados en PTAR; kWh en la energía para la producción de biogás (Lundin, 2002). Pero no se ha considerado la carga contaminante o másica, como una unidad funcional para el ACV, la cual puede ser un factor significativo en el impacto ambiental de la PTAR, dado que incluye el caudal (este a su vez, la población servida, producción de agua potable) y una concentración de contaminante (algunos estudios indican que el afluente o influente de aguas residuales en las PTAR, puede contener bajas concentraciones de metano y dióxido de nitrógeno disuelto, este último está formado en el sistema de recolección de aguas residuales municipales

(Daelman, 2012)), como la  $DBO_5$  que reporta la tendencia de alimentación de la población servida (se asume que el 100% es carbono orgánico en las aguas residuales) así como su concentración de materia orgánica. Cabe anotar que para la línea de lodos, la unidad funcional más utilizada es  $m^3$  de lodo por día en algunos casos el  $kg/día$ ; para la línea de biogás, la unidad funcional más utilizada es  $m^3$  de biogás por día (*Densito Tech*, 2012).

Una dificultad presentada en el inventario (obtención de datos como los procedimientos de cálculos para identificar y cuantificar los efectos ambientales adversos asociados a la unidad funcional) de una ACV es la disponibilidad, homogeneidad y calidad de los datos de las PTAR; la fuente más típica son los datos de PTAR a escala piloto o real, estimaciones de expertos (literatura) y datos estandarizados. Para que exista un ACV adecuado y confiable, debe tener datos de los diseños de las PTAR a escala real, lo que se concibe como el insumo más aproximado para la construcción de la PTAR (Corominas, 2013) y define cuantitativamente el inventario de los recursos consumidos y las emisiones producidas (Foley et al., 2010). En términos de la evaluación en el ACV (los cuales deben ser clasificados, normalizados y valorarlos), se han utilizado metodologías como CML, 7 EDIP 97, 3 ECO INDICATOR 99, 2 IMPACT 2002, 1 EPS, 2 ECO POINTS 97, 1, la diversidad del método puede influir en el resultado de la evaluación ambiental y distanciar el resultado, alejándolo de los aspectos ambientales RECIPE (Corominas, 2013), los cuales debido a la considerados en la PTAR presentan discrepancias en factores como la acidificación, el potencial de eutrofización, el agotamiento abiótico, el potencial de calentamiento global, el potencial de foto ozono creación, entre otros. Por ello, una propuesta puede ser, concebir un método de evaluación ambiental, ajustado a proyectos puntuales como PTAR, con tal de reducir la incertidumbre de los resultados, la subjetividad de los factores ambientales y que pueda ser implementado en proyectos de visión regional para PTAR, así como para la toma de decisión. En la interpretación con el ACV

no se ha incluido de manera amplia el análisis de sensibilidad para determinar los parámetros más influyentes en las PTAR con respecto al ACV; tampoco se ha incluido el análisis de las limitantes de las PTAR (utilización solo de contaminantes convencionales y no emergentes), [ni] el destino de los contaminantes y del enfoque integrador de las PTAR con el cuerpo de agua receptor (Corominas, 2013).

Sin embargo, al aplicar el ACV pueden presentarse limitaciones relacionadas especialmente con la incertidumbre (en los datos utilizados para el inventario; en la metodología utilizadas para analizar el inventario y la evaluación del impacto; y la descripción del sistema a estudiar) así como la subjetividad (asignación de pesos según ideología, política y valores éticos) que puedan sesgar el resultado. Sin embargo, en los ACV se deben reducir las incertidumbres mediante herramientas matemáticas como la lógica difusa, algoritmo de decisiones multi-atributo, entre otros (Guerega, 2006).

Los impactos que pueden generar las PTAR en su operación normal como menor carga ambiental (cantidad de contaminante que llega al medio o la cantidad de recursos extraídos del mismo, es decir, la salida o entrada de materiales o energía de un sistema que causa un efecto ambiental negativo) de sus efectos pero no de reducción de contaminantes (Lundin, 2002), y también puede hacerse un análisis cuidadoso de simulación delimitando geográficamente las PTAR; en varios escenarios para la evaluación ambiental, en función de la normatividad ambiental de vertimientos, las tecnologías (aplicadas según el tipo de contaminante que ingresa al tratamiento y luego en la afectación y/o generación de subproductos como el biogás y lodos (Yoshida, 2013) y características de las PTAR (Wang, 2012).

## 4. Conclusiones

El análisis de ciclo de vida es una técnica para evaluar los aspectos ambientales, el tratamiento ambiental y los impactos ambientales potenciales asociados con un producto o materiales, a lo largo de la vida del producto o materiales; además considera los impactos globales y regionales, y posibilita el estimar impactos que tengan influencia en la salud. El aplicar esta técnica de gestión ambiental en plantas de tratamiento de agua residuales, puede entenderse para conocer la localización en un escenario de simulación, reducción en la fuente de elementos contaminadores (materia orgánica y nutrientes), separar aguas residuales e industriales y lluvias de los sistemas combinados, lo cual presentó mejores resultados en la emisión de gases efecto invernadero, es decir, su ámbito de aplicación es más amplio de un estudio de impacto ambiental o que un plan de manejo de ambiental, dado que se tendría un control y seguimiento ambiental, más veraz y pertinente en el espectro de análisis ambiental de la planta de tratamiento con el ambiente adyacente.

## 5. Referencias

- Ashrafi, O. et al. (2013). Greenhouse gas emission by wastewater treatment plants of the pulp and paper industry-modelling and simulation. *International journal of greenhouse gas control*, 17, 462-472.
- Bani, S. et al. (2010). Estimation of greenhouse generation in wastewater treatment plants-model development and application. *Chemosphere*, 78, 1085-1092.
- Benveniste, G. et al. (2011). Análisis del ciclo de vida y reglas de categoría de producto en la construcción. El caso de las baldosa cerámicas. *Informes de construcción*, 63, 71-81.

- Capitanescu, F. (2016). Cost versus life cycle assessment-based environmental impact optimization of drinking water production plants. *Journal of Environmental Management*, 177, 278-287.
- Colombia. (1997). *Norma técnica Colombiana NTC-ISO 14040. Administración ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Principios y estructura*. Bogotá: ICONTEC.
- Corominas, L. et al. (2013). Including life cycle assessment for decision-making in controlling wastewater nutrient removal systems. *Journal of environmental management*, 128, 759-767.
- Corominas, L. et al. (2013). Life cycle assessment applied to wastewater treatment: state of the art. *Water research*, 47, 5480-5492.
- Corporación andina de fomento. (2009). *Caminos para el futuro. Gestión de la infraestructura en América Latina*. Caracas, Venezuela: CAF.
- Daelman, M. et al. (2012). Methane emission during municipal wastewater treatment. *Water research*, 46, 3657-3670.
- De Carvalho, F. A. (2001). *Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento-aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Deusto, Tech. (2012). *Metodología para el análisis del ciclo de vida de depuradoras de aguas residuales*. Deusto: Universidad de Deusto.
- Foley, J. et al. (2010). Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. *Water research*, 44, 1654-1666.
- Gallego, A. (2008). Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 931-940.

- Guerega, H. L. (2006). *Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis del ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Harrison, L. (1996). *Manual de auditoría medioambiental. Higiene y seguridad*. México D. F.: McGraw Hill Interamericana.
- Hurtado, J. (2000). *Metodología de la investigación holística*. Caracas: Fundación SYPAL.
- Keoleian, G. (1988). Prevención de la contaminación a través del diseño del ciclo de vida. En H. Freeman, *Manual de la prevención de la contaminación industrial* (págs. 253-294). USA: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE MEXICO.
- Kiely, G. (1999). *Ingeniería ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Madrid, España: McGraw Hill/Interamericana de España S. A. U.
- Liu, S. (2016). Evaluation of the environmental performance of the chilled ceiling system using life cycle assessment (LCA): A case study in Singapore. *Building and Environment*, 102, 207-216.
- Lorenzo, Y. (2016). Beyond the conventional life cycle inventory in wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*, 533, 71-82.
- Lundin, M. et al. (2002). A life cycle assessment based procedure for development of environmental sustainability indicators for urban water systems. *Urban water*, 4, 145-152.
- Machado, A. P. et al. (2007). Life cycle assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities. *Water science & technology*, 56, 15-22.
- Mills, N. et al. (2014). Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies. *Waste management*, 34, 185-195.

- Morrison, M. (2016). Complementary life cycle assessment of wastewater treatment plants: An integrated approach to comprehensive upstream and downstream impact assessments and its extension to building-level wastewater generation. *Sustainable Cities and Society*, 23, 37-49.
- Pognani, M. E. (2012). A complete mass balance of a complex combined anaerobic/aerobic municipal source-separated waste treatment plant. *Waste management*, 32, 799-805.
- Rodríguez, G. et al. (2011). Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. *Water Research*, 45, 5997-6010.
- Vergel, G. (2010). *Metodología. Un manual para la elaboración de diseños y proyectos de investigación. Compilación y ampliación temática*. Barranquilla: Publicaciones Corporación UNICOSTA.
- Wang, X. et al. (2012). Environmental profile of typical anaerobic/anoxic/oxic wastewater treatment systems meeting increasingly stringent treatment standards from a life cycle perspective. *Bioresource technology*, 126, 31-40.
- Xiaoyong, Y. et al. (2013). Life cycle assessment of a municipal wastewater treatment plant: a case study in suzhou, china. *Journal of cleaner production*, 57, 221-227.
- Yoshida, Y. et al. (2013). A comprehensive substance flow analysis of municipal wastewater and sludge treatment plant. *Chemosphere*, 138, 1-9.
- Zhang, Q. H. et al. (2010). Application of life cycle assessment for an evaluation of wastewater treatment and reuse project-case study of Xi An, China. *Bioresource technology*, 101, 1421-1425.
- Zhou, Y. et al. (2013). Energy utilization in sewage treatment a review with comparisons. *Water and climate change*, 4, 1-10.

### **Juan Pablo Rodríguez Miranda**

Ingeniero Sanitario y Ambiental egresado de la Universidad de la Costa (CUC); maestría en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá; maestría en Gestión y Evaluación Ambiental de la Universidad “Sergio Arboleda”. Estudiante del doctorado en Ingeniería por la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. Profesor Asociado de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco “José de Caldas” (Bogotá, Colombia); director del grupo de investigación AQUAFORMAT. Investigador Asociado (Vigencia mayo de 2018) según el Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología de Colombia (COLCIENCIAS).

Correo electrónico: [jprodriguez@udistrital.edu.co](mailto:jprodriguez@udistrital.edu.co)

### **César Augusto García Ubaque**

Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá; maestría en Ingeniería Civil por la Universidad de los Andes; doctor en Ingeniería de la Universidad de los Andes. Profesor Asociado de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” (Bogotá, Colombia). Director del grupo de investigación Grupo de Investigación en Ingeniería Civil Universidad Distrital (GIICUD). Investigador Asociado (Vigencia mayo de 2018) según el Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología de Colombia (COLCIENCIAS).

Correo electrónico: [cgarciabaque@gmail.com](mailto:cgarciabaque@gmail.com)

*Juan Pablo Rodríguez Miranda, César Augusto García Ubaque, Carlos Alfonso Zafra Mejía*

### **Carlos Alfonso Zafra Mejía**

Ingeniero Civil de la Universidad Industrial de Santander; maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Cantabria (España); doctor en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria (España). Profesor Asociado de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” (Bogotá, Colombia). Director del grupo de investigación en Ingeniería Ambiental (GIIAUD). Investigador Asociado (Vigencia mayo de 2018) según el Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología de Colombia (COLCIENCIAS).

Correo electrónico: [czafra@udistrital.edu.co](mailto:czafra@udistrital.edu.co)

**Recibido:** 12-05-2016

**Aprobado:** 12-08-2016