



Análisis de la huella de carbono en una planta de tratamiento de agua tipo carrusel

David Blanco doctor, Grupo TRB, Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Oviedo
Sergio Collado doctor, Grupo TBR, Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Oviedo
Mario Díaz catedrático, Grupo TBR, Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Oviedo
María Pilar Suárez jefa de Planta de la EDAR Baiña, Acciona Agua
Julio Antonio Pérez gerente de Departamento Zona Norte II de Acciona Agua
Jesús Sánchez jefe de Servicio Depurar 7B-Aragón de Acciona Agua

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales fueron diseñados inicialmente con fines de salud pública, pero la importancia social que han ido adquiriendo los aspectos medioambientales y de sostenibilidad requieren su introducción en los análisis de diseño y de operación de las plantas. En este contexto, se ha realizado el análisis del ciclo de vida (ACV) para una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) real de tipo carrusel con aprovechamiento agrícola de lodos, en la operación durante el último cuatrimestre del año 2012. En la planta global, el depósito de los metales pesados del lodo en el suelo convierte a la ecotoxicidad en una categoría de impacto de primer orden. Los resultados obtenidos del estudio de la huella de carbono (HC) han mostrado valores en el intervalo de 2-6 kg de CO₂ eq/HE, reduciéndose conforme se produce más lodo, pero aumentando la ecotoxicidad y, con ello, el impacto ambiental en el ACV.

Palabras clave

Huella de carbono (HC), ecotoxicidad, tratamiento de aguas, análisis del ciclo de vida (ACV), sostenibilidad.

Carbon Footprint analysis in a wastewater treatment plant carousel type

Although wastewater treatment systems were initially designed for hygiene reasons, the social significance that environmental and sustainability issues have acquired lately requires its introduction in the design and analysis of operating plants. In this context, a life cycle assessment (LCA) for actual carousel plant with agricultural use of sludge in operation during the last quarter of 2012 was made. At global level, ecotoxicity has been shown as an impact category of first order, mainly due to the deposition of heavy metals in the soil. The results of the study of the carbon footprint showed values in the range of 2-6 kg of CO₂ eq/HE, decreasing as more sludge is produced but on the other hand increasing the global environmental impact due to the ecotoxicity growth.

Keywords

Carbon footprint, ecotoxicity, water treatment, life cycle analysis, sustainability.



1. Introducción

Hoy en día, la conciencia social del ser humano hacia el medio ambiente ha cambiado y, por ello, se demanda un mayor estudio desde el punto de vista medioambiental de todos los procesos, productos y servicios, añadiendo dicha sostenibilidad a los objetivos generales y modificando la tecnología de diseño y operación [1]. Pensar en una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) equivale a pensar en un sistema amigable con el medio ambiente. Sin embargo, es recomendable tener en cuenta sus posibles efectos dañinos: consumo de energía, uso de productos químicos, emisiones a la atmósfera, producción de lodos, etc., para tratar de desarrollar y aplicar nuevas soluciones que mejoren la infraestructura existente para la gestión de las aguas residuales [2,3].

Uno de los más importantes problemas ambientales a nivel mundial son las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estos gases impiden que el calor de la Tierra vuelva a la atmósfera, provocando temperaturas más altas en la superficie. Se está desarrollando un mercado de comercio basado en la huella de carbono (HC) con el fin de controlar la contaminación, proporcionando incentivos económicos a las industrias que consigan reducciones en las emisiones de este tipo de gases. Por tanto, se ha convertido en una necesidad la determinación de la HC de las EDAR, no solo por lo ya mencionado, sino también por su vulnerabilidad a los protocolos y normas internacionales que pueden acarrear impuestos y multas [4].

El término huella de carbono surge del concepto de huella ecológica (HE). Así como la HE de un individuo mide la superficie biológica necesaria para producir bienes y servicios consumidos por el individuo o enti-

dad y la capacidad para asimilar los residuos que genera, la HC mide la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto. Por ello, el término correcto sería HC equivalente o emisiones de CO₂ equivalentes (kg CO₂ eq), aunque en la práctica y por comodidad se utiliza simplemente el término HC [5].

Las operaciones de gestión de residuos producen los tres principales gases de efecto invernadero: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de cantidades adicionales de CO₂ y CH₄ de las demandas de energía de la planta. Estas emisiones pueden ser directas e indirectas, siendo la detección de 'puntos calientes' del sistema de gran utilidad a la hora de proponer alternativas de diseño y operación para minimizar dichas emisiones y, como consecuencia de ello, la huella de carbono. Con el fin de poner en práctica las políticas de mitigación, es necesario contabilizar correctamente las emisiones de gases de efecto invernadero [6].

Debido a que únicamente engloba una pequeña parte del impacto ambiental, sería interesante complementar el uso de la HC con otro tipo de herramientas más globales, como podría ser el análisis del ciclo de vida (ACV) [7,8]. Esta herramienta de gestión estudia los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo de la vida de un producto o una actividad, desde su origen como materia prima hasta su final como residuo, resultando muy útil a la hora de desarrollar formas de trabajo menos impactantes para el medio ambiente [9,10]. En realidad, la HC es una versión simplificada de un ACV en el que, en lugar de considerar varias categorías de impacto ambiental al mismo tiempo, se considera únicamente una de ellas, la

relativa al calentamiento global. Para su desarrollo se cuenta con la ayuda de una herramienta informática denominada SimaPro v8.0 [11], ya que dispone de adecuadas bases de datos para llevar a cabo el estudio.

Analizando lo expuesto anteriormente, el objetivo básico que se persigue con la realización de este trabajo es realizar un análisis de los aspectos medioambientales más importantes de una planta de tratamiento de aguas residuales situada en España, con el fin de establecer su conveniencia y proponer alternativas de mejora, centrándonos especialmente en la HC de la misma.

2. Metodología

Las normas ISO de la serie 14000 incluyen la ISO 14001 relativa a los Sistemas de Gestión Medioambiental, así como un conjunto de normas relacionadas con el ACV (la serie 14040). Las actividades de ISO relacionadas con este tema empezaron en 1994 y tienen el objetivo de producir la primera serie completa de normas sobre ACV. Las normas ISO de la serie 14040 hacen referencia a los aspectos técnicos y de organización para el desarrollo de un estudio de ACV, dando una atención especial a las declaraciones públicas [12].

2.1. Objetivos y alcance

Se realizó un ACV a una EDAR operada por Acciona Agua, buscando analizar sus repercusiones medioambientales, así como posibles oportunidades de mejora desde el punto de vista del diseño y la operación, fundamentalmente en el apartado del calentamiento global o la huella de carbono.

2.1.1. Sistemas a estudiar

Esta pequeña planta de tratamiento de aguas, para aproximadamente 530 habitantes equivalentes diarios,

trata como promedio unos 5.100 m³/día de agua y obtiene unas 4,72 toneladas diarias de lodo. Dispone de pretratamiento (desbaste, desarenado, desengrasado), decantación primaria, tratamiento biológico de fangos activos en canal de oxidación, decantación secundaria y tratamiento de lodos (espesador, deshidratador).

2.1.2. Función del sistema

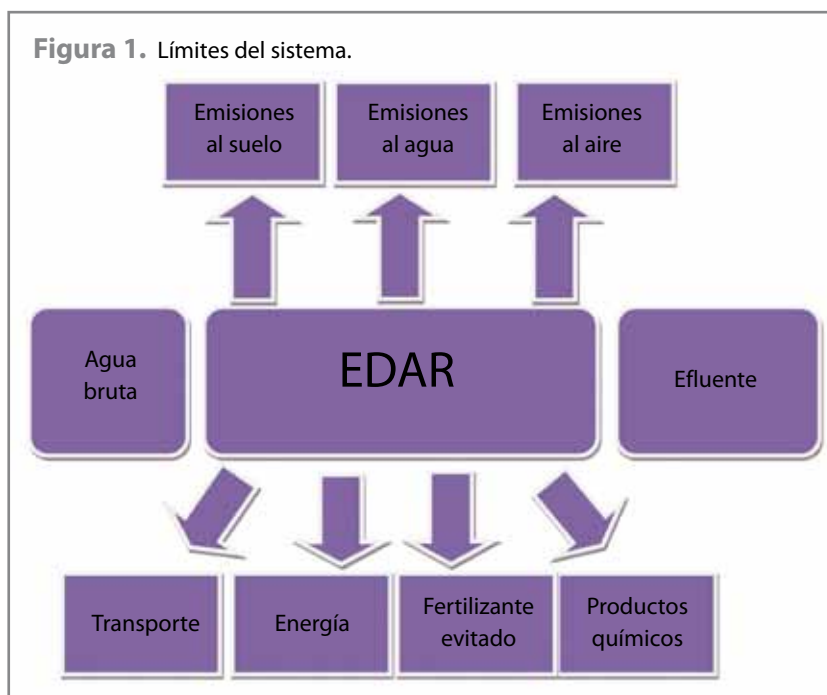
La función del sistema analizado es tratar el agua bruta mediante procedimientos físicos, químicos y biotecnológicos para conseguir un agua efluente de mejor calidad en base a ciertos parámetros normalizados.

2.1.3. Unidad funcional

Los primeros ACV realizados a plantas de tratamiento de aguas utilizaban como unidad funcional la cantidad de influente en un determinado periodo de tiempo. El principal inconveniente de esta unidad funcional es que no tiene en cuenta la concentración de contaminantes presente en el agua residual, lo que supone un problema de cara a la comparación entre EDAR. Para solventar esto, se propuso el uso del habitante equivalente (he), definido como la carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxígeno de cinco días (DBO₅), de 60 gramos de oxígeno diarios. Por tanto, la unidad funcional será 1 he [13,14].

2.1.4. Límites del sistema

El tipo de ACV desarrollado en este trabajo (**Figura 1**) se denomina *gate to gate*, ya que analiza el impacto ambiental desde la entrada de las aguas en la EDAR hasta su salida con el vertido al cauce fluvial, no teniendo en cuenta los impactos que ocurren aguas arriba (extracción del agua, potabilización, consumo...).



Este enfoque es acertado según varios trabajos [13,15], que concluyen que el estudio se debería centrar en estas etapas posteriores.

2.2. Inventario del ciclo de vida

2.2.1. Calidad de los datos

La mayoría de los datos utilizados para llevar a cabo este estudio han sido suministrados por Acciona Agua a partir de la operación de plantas reales. Para otra serie de datos no medidos *in situ*, se ha recurrido a información bibliográfica sobre procesos similares, estimaciones siguiendo las recomendaciones del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) [5,16] y bases de datos incorporadas por el programa SimaPro [11]. Así mismo, se han realizado algunas aproximaciones que se comentan durante el desarrollo del apartado siguiente.

2.2.2. Hipótesis planteadas y limitaciones

Se ha utilizado el boletín que publica mensualmente WWF (World Wildlife Fund for Nature) sobre la elec-

tricidad para estimar las emisiones indirectas de CO₂ generadas en la producción de la energía que consume la planta.

Las emisiones directas de gases (operación y vertido) se han calculado siguiendo las recomendaciones de la IPCC.

En las plantas con aplicación agrícola del lodo, su contenido en N y P reduce la utilización de fertilizantes, de forma que 1 kg de lodo seco equivale a 0,5 kg de fertilizante. La proporción entre estos elementos en el lodo según la analítica del fango marcará el porcentaje de sustitución de cada fertilizante [17].

Para las emisiones al suelo de los metales pesados contenidos en el lodo (Cu, Cd, Cr, Hg, Pb, Ni, Zn) se ha considerado una biodisponibilidad del 100%, hipótesis más desfavorable desde la perspectiva ambiental [17].

El único producto químico considerado es el polielectrolito.

No se ha tenido en cuenta el posible impacto de la construcción de la planta, al resultar despreciable en otros ACV similares [15].



En la evaluación del impacto ambiental de una EDAR, la principal categoría de impacto es la ecotoxicidad, debido fundamentalmente a la deposición de los lodos. También deben tenerse en cuenta otros factores como el cambio climático, los respiratorios inorgánicos, los combustibles fósiles y, sobre todo, la operación de la EDAR, que es el impacto negativo más importante

Respecto al transporte de productos químicos, residuos sólidos y lodos, se han estimado las distancias entre las zonas de producción química, de gestión de residuos y de aplicación de lodos y la EDAR. Para representar el coste ambiental de este transporte se han usado los datos de Ecoinvent Unit Processes, porque son los que mejor se adaptan a las características de los camiones utilizados (capacidad y tipo de combustible).

A continuación se consideran todas las entradas y salidas al sistema definidas anteriormente. Para poder desarrollar el inventario, se utiliza una serie de bases de datos como Ecoinvent Unit Processes y LCA Food DK, ambas presentes en el software SimaPro v8.0. Se han ajustado los datos según la unidad funcional (1 he), clasificándolos para introducirlos al software como 'Entradas', 'Salidas' y 'Productos evitados'. Una vez completada la fase de inventario, se está en disposición de introducir los datos calculados a la herramienta informática y obtener los principales impactos ambientales del sistema.

3. Resultados y discusión

3.1. Evaluación del impacto del ciclo de vida

Con el objetivo de poder comparar los resultados obtenidos, se ha realizado la evaluación de los impactos del ciclo de vida (EICV) utilizando

dos métodos distintos. El primero de ellos (Eco-Indicator) se utiliza como base del ACV porque permite comparar fácilmente un sistema con otro a partir de la unidad de impacto ambiental (Pt). El segundo, CML 2 Baseline, resulta útil para la parte específica de la huella de carbono, al expresar el calentamiento global en kg CO₂ eq. Existen varias formas de expresar los resultados asociados al sistema objeto de estudio, siendo los más importante:

- Caracterización. Se obtiene una serie de barras que muestran la aportación de cada subsistema considerado a cada categoría de impacto incluida en el método, con respecto al 100%.
- Normalización. Mediante el uso de factores de normalización se evalúa la significación del perfil ambiental obtenido en la caracterización, permitiendo comparar la importan-

cia de los impactos ocasionados en una categoría con los demás.

No se ha podido realizar el estudio para todo el año 2012 completo, ya que en septiembre de 2012 se cambió el sistema de toma de datos y antes de esa fecha resultó muy complicado estimar algunos valores necesarios para realizar el ACV de manera exhaustiva. Por consiguiente, el estudio está reducido a los últimos 4 meses del año en cuestión.

La **Figura 2** debe tomarse como una primera aproximación al sistema estudiado. Destaca la presencia del impacto positivo llamado 'Producto evitado' en 5 de las 11 categorías de impacto, con un peso por encima del 25% en todas ellas y destacando sobre todo la acidificación en el que el impacto positivo supera al negativo. El aprovechamiento del lodo para uso agrícola (gris) evita tener que usar fertilizante y, por consiguiente, disminuye el impacto ambiental. El uso de productos químicos (verde) no parece ser muy importante, ya que únicamente aparece en dos categorías de impacto y con pesos por debajo del 10%. El consumo eléctrico (naranja) y el transporte de lodos (amarillo) aparecen en todas las categorías salvo en la ecotoxicidad. Finalmente, la operación de la EDAR (azul) tiene presencia en la ecotoxici-

Figura 2. Caracterización de impactos Sistema 2: 2012 según Eco-Indicator.

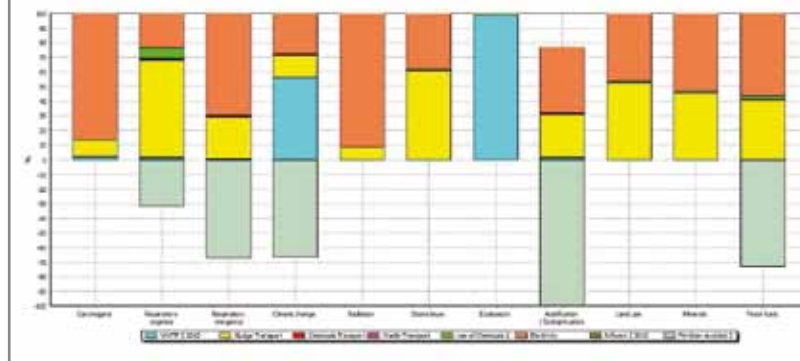
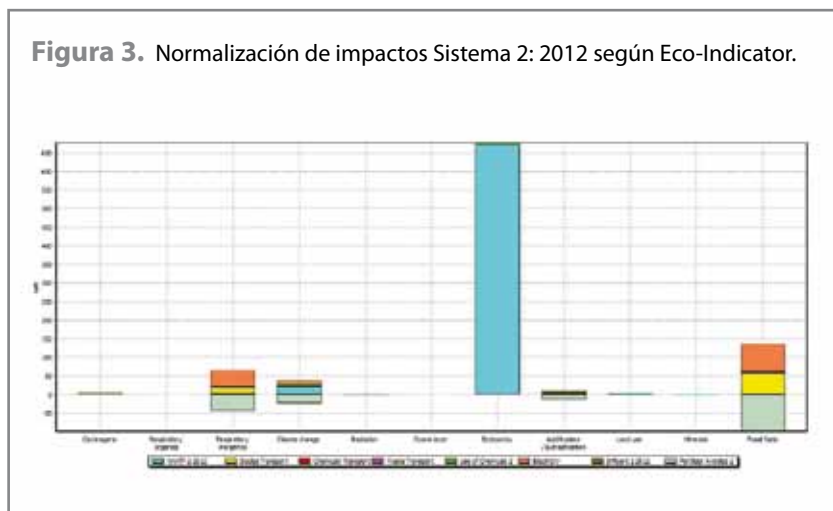


Figura 3. Normalización de impactos Sistema 2: 2012 según Eco-Indicator.



dad (prácticamente en su totalidad) y en el cambio climático.

Analizando la **Figura 3** (normalización), se puede obtener ya una idea más real de lo que está ocurriendo en el sistema. De las 11 categorías de impacto, se pueden considerar relevantes únicamente las siguientes: ecotoxicidad, combustibles fósiles, respiratorios inorgánicos y cambio climático.

Se puede afrontar numéricamente el caso de manera más sencilla, centrándose únicamente en dichas categorías (**Tabla 1**). Analizando los resultados en términos de subsistemas, prácticamente la totalidad del impacto es debido a la operación de la EDAR (>90%). El impacto positivo del aprovechamiento agrícola del lodo (-22%) compensa prácticamente los impactos debidos al consumo

eléctrico (18%) y al transporte de lodos (11%). Desde el punto de vista de las categorías de impacto, la ecotoxicidad es la única que no se ve afectada por el fertilizante evitado, por lo que domina con un 91%. El 9% restante se lo reparten entre los combustibles fósiles, los respiratorios inorgánicos y el cambio climático.

Para poner el punto final al análisis del sistema, se determina la HC a partir del método mencionado CML Baseline (**Tabla 2**). Analizando los resultados obtenidos, se observa que el mes de septiembre se destaca claramente con un valor de huella de carbono que dobla cualquiera de los otros 3. Esto es debido a que la huella de carbono se mide a partir de la categoría de impacto de calentamiento global o cambio climático. Por tanto, el bajo valor de volumen de lodos generados ese mes hará que disminuya el impacto del subsistema transporte, pero también el impacto positivo de fer-

Tabla 1. Categorías de impactos según el método Eco-indicator 99 (E) V.2.05.

Sistema	EDAR (mPt)	Transporte lodos (mPt)	Fertilizante evitado (mPt)	Consumo eléctrico (mPt)	Total (mPt)
Combustibles fósiles	-	55,1	-99	76,8	33 (4%)
Respiratorios inorgánicos	0,198	18,6	-43,9	45,4	20 (3%)
Ecotoxicidad	673	2,52	-	2,44	678 (91%)
Cambio climático	20,4	5,62	-24,4	10,2	12 (2%)
Total (mPt)	693 (93%)	82 (11%)	-167 (-22%)	135 (18%)	743

Tabla 2. Determinación de la huella de carbono a partir del método CML Baseline.

Sistema año 2012	Habitantes equivalentes (he)	HC (kg CO ₂ eq/he)	HC _{Total} (tn CO ₂ eq)
Septiembre	16.071	5,5	88,39
Octubre	15.161	2,15	32,60
Noviembre	12.687	2,18	27,66
Diciembre	16.839	2,63	44,29
Media	15.190	3,25	49,37



Queda comprobado que la huella de carbono del sistema aumenta con el impacto relativo a la operación de la EDAR, el consumo eléctrico y el transporte de lodos. Y resulta interesante que el impacto de la evaluación ambiental total y la magnitud de la huella de carbono siguen comportamientos bastante opuestos

tilizante evitado. Como para dicha categoría el fertilizante evitado tiene del orden de 5 veces más peso, una disminución del volumen de lodo generado provocará una huella de carbono superior.

Como los valores de habitantes equivalentes de cada uno de los 4 meses son bastante similares, las tendencias vistas para la HC referida a la unidad funcional son prácticamente idénticas a las de los valores globales.

4. Conclusiones

La evaluación del impacto ambiental de plantas de tratamiento de aguas introduce una componente ambiental y de sostenibilidad importante para las consideraciones de diseño y operación de plantas. El resultado del estudio de impacto ambiental global y de la huella de carbono utilizando datos reales de una planta de tipo carrusel con aprovechamiento agrario de lodos ha permitido identificar algunos aspectos de particular interés:

- La principal categoría de impacto del estudio es la ecotoxicidad, debido fundamentalmente a la deposición de los lodos. Las otras categorías con algún peso son el cambio climático, los respiratorios inorgánicos y los combustibles fósiles. El impacto negativo más importante viene de la operación de la EDAR.

El consumo eléctrico, el transporte y el uso de productos químicos le siguen con un peso menos relevante. Finalmente, el impacto positivo del ahorro de fertilizante debido al aprovechamiento agrícola de lodos, clave para entender el comportamiento ambiental de la planta.

- La huella de carbono del sistema aumenta con el impacto relativo a la operación de la EDAR, el consumo eléctrico y el transporte de lodos. Así mismo, disminuye considerablemente con el aprovechamiento del lodo. Por lo tanto, este último será el factor determinante a la hora de reducir su valor.

- Resulta interesante comentar que el impacto de la evaluación ambiental total (Pt) y la magnitud de la huella de carbono (kg CO₂ eq/he) siguen comportamientos bastante opuestos, en particular con respecto a los lodos. Esto es debido a que un mayor volumen de lodos aumenta los depósitos de metales pesados, la ecotoxicidad y, con ello, el impacto ambiental. Sin embargo, esto también aumenta el ahorro de fertilizante, reduciendo el calentamiento global y, con ello, la huella de carbono.

5. Agradecimientos

El contenido de este documento recoge los resultados de un proyecto de investigación desarrollado durante el año 2013 en colaboración con Acciona Agua.

Bibliografía

- [1] Rodríguez-García, G.; Molinos-Senante, M.; Hospido, A.; Hernández-Sancho, F.; Moreira, M.T.; Feijoo, G. (2011). Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. *Water Research*, vol. 45, núm. 18, págs. 5.997-6.010.
- [2] Svardal, K.; Kroiss, H. (2011). Energy requirements for waste water treatment. *Water Science and Technology*, núm. 64(6), págs. 1.355-1.361.
- [3] Balmer, P.; Hellström, D. (2012). Performance indicators for wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, núm. 65(7), págs. 1.304-1.310.
- [4] Remy, C.; Lesjean, B.; Waschnewski, J. (2013). Identifying energy and carbon footprint optimization potentials of a sludge treatment line with Life Cycle Assessment. *Water Science and Technology*, núm. 67(1), págs. 63-73.
- [5] Houghton, J.T.; Ding, Y.; Griggs, D.J.; Noguer, M.; van der Linden, P.J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C.A. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- [6] Yerushalmi, L.; Ashrafi, O.; Haghghat, F. (2013). Reductions in greenhouse gas (GHG) generation and energy consumption in wastewater treatment plants. *Water Science & Technology*, vol. 67, núm. 5, págs. 1.159-1.164.
- [7] Li, Y.; Luo, X.; Huang, X.; Wang, D.; Zhang, W. (2013). Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant: A case study in Suzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, núm. 57, págs. 221-227.
- [8] Corominas, L.; Foley, J.; Guest, J.S.; Hospido, A.; Larsen, H.F.; Morera, S.; Shaw, A. (2013). Life cycle assessment applied to wastewater treatment: state of the art. *Water Research*, núm. 47(15), págs. 5.480-5.492.
- [9] Calderón, L.A.; Iglesias, L.; Laca, A.; Herrero, M.; Díaz, M. (2010). The utility of Life Cycle Assessment in the ready meal food industry. *Resources, Conservation and Recycling*, núm. 54(12), págs. 1.196-1.207.
- [10] Iglesias, L.; Laca, A.; Herrero, M.; Díaz, M. (2012). A life cycle assessment comparison between centralized and decentralized biodiesel production from raw sunflower oil and waste cooking oils. *Journal of Cleaner Production*, núm. 37, págs. 162-17.
- [11] SimaPro Tutorial and Database Manuals. Pre consultants, Netherlands (2004).
- [12] ISO 14040 Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. Geneva, Switzerland: International Standards Organisation (ISO) (2006).
- [13] Lundin, M.; Bengtsson, M.; Molander, S. (2000). Life cycle assessment of wastewater systems: Influence of system boundaries and scale on calculated environmental loads. *Environmental Science and Technology*, núm. 34(1), págs. 180-186.
- [14] Gallego, A.; Hospido, A.; Moreira, M.T.; Feijoo, G. (2008). Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations. *Resources, Conservation and Recycling*, núm. 52, págs. 931-940.
- [15] Lassaux, S.; Renzoni, R.; Germain, A. (2007). Life cycle assessment of water: from the pumping station to the wastewater treatment plant. *Int. J. Life Cycle Assess.*, núm. 12(2), págs. 118-126.
- [16] Doorn, M.R.J.; Towprayoon, S.; Manso Vieira, S.M.; Irving, W.; Palmer, C.; Pipatti, R.; Wang, C. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES, vol. 5, Japan.
- [17] Singh, R.P.; Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, núm. 28(2), págs. 347-358.