

INTEGRACIÓN DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE RESIDUOS

David Bernad-Beltrán

María D. Bovea

Antonio Gallardo

Francisco J. Colomer

Dpto. Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I de Castellón. España

Abstract

Life Cycle Assessment (LCA) is the most suitable method for the environmental evaluation of waste management systems. Several software tools have been developed to enable the realization of this kind of analyses in waste management field. Nevertheless, certain drawbacks have been associated to the utilization of these tools, such as pre-fixed inventory data, limited functionality which do not enable to accurately model the scenario under analysis, or the fact of not taking into account site-dependent aspects.

These drawbacks can be solved by means of the integration between LCA and Geographic Information Systems (GIS). This integrating methodology of LCA and GIS can be described as a set of procedures that enable to take advantage of certain functionalities which are provided by GIS tools, in order to estimate more rigorously the contribution to the impact of aspects which are dependent of the location of facilities, such as collection and transport of waste. Moreover, the integration enables the incorporation to the analysis of an impact category which is usually excluded from this kind of studies: land use.

Keywords: *Life cycle assessment, geographical information system, LCA, GIS, integration, waste management, land use*

Resumen

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es el método más adecuado para la evaluación ambiental de sistemas de gestión de residuos. Se han desarrollado distintas herramientas informáticas que facilitan la realización de estos análisis en el ámbito de la gestión de residuos. Sin embargo, presentan algunos inconvenientes como utilización de datos de inventario pre-fijados, funcionalidades que no permiten modelar con exactitud el escenario a analizar o el hecho de no considerar aspectos dependientes de la ubicación.

Estos inconvenientes pueden resolverse mediante la integración de la técnica de ACV con Sistema de Información Geográfica (SIG). Esta metodología de integración de ACV y SIG consiste en un conjunto de procedimientos que permiten aprovechar ciertas funcionalidades que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica para poder calcular con mayor rigor la contribución al impacto de aspectos dependientes de la ubicación de instalaciones, como la recogida y el transporte de los residuos. Además, permite la incorporación al análisis de una categoría de impacto habitualmente excluida en este tipo de estudios: el uso del suelo.

Análisis de ciclo de vida, sistema de información geográfica, ACV, SIG, gestión de residuos, uso del suelo

Palabras clave: *Análisis de ciclo de vida, sistema de información geográfica, ACV, SIG, gestión de residuos, uso del suelo*

1. Introducción

La legislación actual en materia de residuos incide de manera particular sobre la necesidad de proporcionar tratamiento global específico a la fracción orgánica, también conocida como biorresiduo (Directiva 2008/98). Los objetivos marcados en dicha directiva, refrendados por la Ley 22/2011 española sobre residuos y suelos contaminados, son considerados insuficientes por una gran cantidad de agentes involucrados, si se desea aprovechar al máximo el potencial que ofrece esta fracción (The Biowaste Alliance, 2009). Se han llevado a cabo en los últimos años una serie de estudios a nivel europeo que tienen como objetivo analizar la necesidad de establecer regulación específica en materia de biorresiduos, así como estudiar los beneficios potenciales a alcanzar si éstos son recogidos selectivamente en origen y tratados biológicamente en plantas específicas (European Commission DG Environment, 2011). A nivel nacional se pretende incrementar la cantidad de fracción orgánica recogida selectivamente como mínimo a 2 millones de toneladas para destinarlas a compostaje o biometanización (PNIR 2008-2015), mientras que a nivel de Comunidad Valenciana, la actual Revisión y Actualización del Plan Integral de Residuos, PIR (2010) establece realizar experiencias piloto para poder implantar la recogida selectiva de materia orgánica en núcleos de más de 100.000 habitantes en 3 años y núcleos de más de 2.000 habitantes en 6 años.

Modificaciones en la forma en que los residuos son gestionados supone cambios en los impactos ambientales que esta gestión global ocasiona. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (UNE-EN ISO 14040-44, 2006) es la herramienta más efectiva para obtener una medida objetiva del impacto ambiental de los sistemas de gestión de residuos. Se han desarrollado diferentes herramientas específicas que permiten desarrollar estudios de ACV de sistemas de gestión de residuos. Sin embargo, en general, presentan inconvenientes relacionados con la capacidad de modelar el escenario real, dificultad para adaptar los datos de inventario al caso de estudio, etc. (Bernad-Beltrán et al., 2010). Por otra parte, se observa que estas herramientas serían más útiles si además, incorporaran una forma dinámica de considerar la etapa del transporte de los residuos o la categoría de impacto uso del suelo en vertedero, entre otros.

2. Objetivos y metodología

Ante la situación descrita en el apartado anterior, el objetivo fundamental de esta comunicación es desarrollar una metodología de integración entre el ACV y un Sistema de Información Geográfica (SIG), que permita evaluar el comportamiento ambiental de los sistemas de gestión de residuos, empleando en la medida de lo posible datos propios de inventario, considerando rutas óptimas de transporte entre instalaciones e incorporando la categoría de impacto uso del suelo. Como validación de la herramienta, se realizará un caso de aplicación comparando dos sistemas de gestión de residuos para un mismo municipio: escenario actual y escenario futuro que incorpora la recogida selectiva de la fracción biorresiduo.

Para ello, se han seguido los siguientes pasos: ¹⁾definición de escenarios a analizar, ²⁾recopilación de datos de inventario para cada uno de los procesos involucrados en la gestión de residuos con cada escenario, ³⁾selección de categorías de impacto para evaluar los escenarios. Definición de la categoría "uso del suelo", ⁴⁾desarrollo de la herramienta de integración ACV-GIS en el entorno *Model Builder* (ESRI, 2006), y ⁵⁾aplicación de la herramienta de integración ACV-GIS a los escenarios.

3. Definición de escenarios

Tomando como base la gestión de residuos de un municipio cuya composición es la mostrada en la Tabla 1, el objetivo es analizar el comportamiento ambiental de dos formas diferentes de recogida selectiva, y por tanto, de gestión.

Tabla 1. Composición de residuos (PNIR 2008-2015)

Fracción	Biorresiduo	Papel	Plástico	Vidrio	Férrico	No férrico	Madera	Otros
%	44	21	10.6	7	3.4	0.7	1	12.3

El escenario A (Figura 1) recoge en área de aportación las fracciones de envases, papel-cartón y vidrio, que tras pasar por respectivas plantas de clasificación, se destinan a su reciclaje. La fracción resto se recoge a nivel de acera, y tras pasar por una estación de transferencia (ET) se envía a una planta de recuperación de materiales (PRM), donde se segregan las fracciones: orgánica, metal férrico y no férrico. La materia orgánica se lleva a una planta de compostaje de materia orgánica a partir de residuo mezcla, cuyas características se detallan en la Figura 3.

En el escenario B (Figura 2) se incorpora la recogida selectiva de la materia orgánica a nivel de acera, separada de la fracción resto. Esta materia orgánica es destinada directamente a una planta de compostaje de biorresiduos recogidos selectivamente sin pasar por selección previa, cuyas características son las mostradas en la Figura 4.

Figura 1. Escenario A, que representa el actual sistema de recogida selectiva

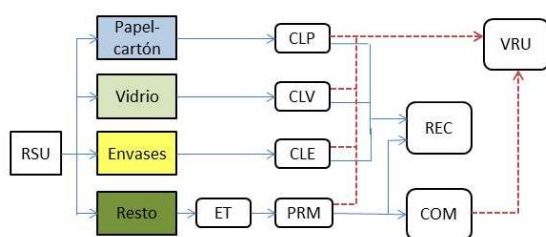
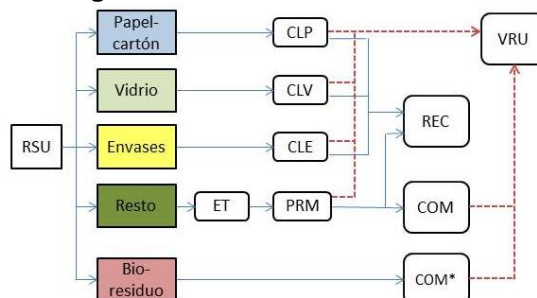


Figura 2. Escenario B, que incorpora la recogida selectiva del biorresiduo



RSU: Residuos Sólidos Urbanos, ET: Estación Transferencia; CLP: Clasificación Papel, CLV: Clasificación Vidrio, PRM: Planta Recuperación Materiales, REC: Reciclado, VRU: Vertido, COM: Compostaje de biorresiduo recogido en masa, COM*: Compostaje de biorresiduo recogido selectivamente

Para el escenario B, se plantean cuatro alternativas: B1, B2, B3 y B4, que se diferencian en la ubicación del vertedero, con el fin de comparar el impacto de la categoría uso del suelo en cada ubicación. Este cambio de ubicación, tendrá también influencia en los indicadores del resto de categorías de impacto consideradas, ya que varían las distancias de transporte.

4. Datos de inventario

La etapa de obtención de datos de inventario es la más costosa en los estudios de ACV. En este estudio se ha hecho un esfuerzo importante por obtener datos primarios (datos obtenidos directamente de instalaciones de gestión de residuos) para la mayoría de las etapas en que se divide el ciclo de vida de un sistema de gestión de residuos (Tabla 2).

Especial hincapié se ha hecho en la obtención de datos de inventario del proceso de compostaje, con el fin de diferenciar las características del proceso de compostaje de

materia orgánica separada de la fracción mezcla en una PRM (escenario A), del proceso de compostaje del biorresiduo recogido selectivamente (escenarios B, B_i). Los datos son los mostrados en las Figuras 3 y 4.

Los datos minoritarios, así como los correspondientes a los procesos de vertedero y reciclaje de las diferentes fracciones se han obtenido de Ecoinvent (2008).

Tabla 2. Datos de inventario

Instalación	Electricidad (kWh/t)	Diesel (l/t)	Agua (m ³ /t)	Eficiencia en la recuperación (%)
Estación de transferencia	1.3658	1.7614	0.0431	Resto: 100%
Planta recuperación de materiales	8.1089	0.5636	0.0041	Biorresiduo: 41.34% Papel-Cartón: 3.18% Metal férrico: 1.73% Metal no férrico: 0.39% Plástico: 0.36% Rechazo: 53%
Clasificadora de vidrio	8.05	0.5250	-	Vidrio: 87% Rechazo: 13%
Clasificadora de papel-cartón	3.9963	2.5821	-	Papel-cartón: 96% Rechazo: 4%
Clasificadora de envases	6.1	-	-	PET: 19.23% PEAD: 15.23% Film: 10.10% Brick: 6.49% Mezcla plásticos: 5.35% Metales: 11.94% Rechazo: 31.66%

Figura 3. Características planta de compostaje de biorresiduos recogidos en masa

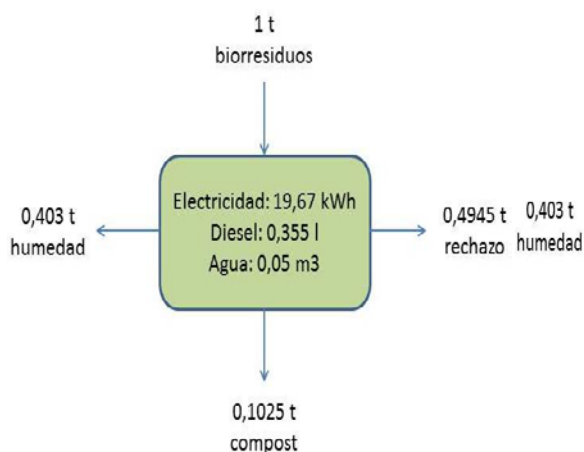
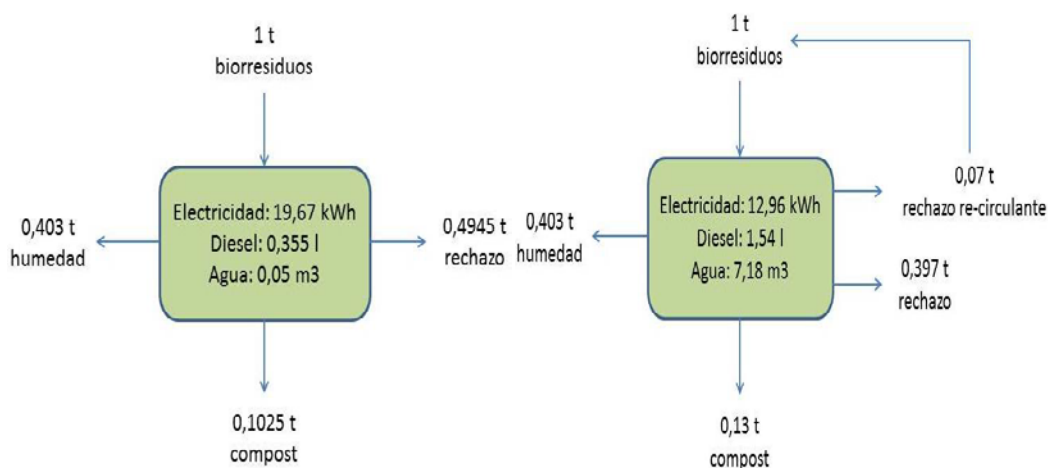


Figura 4. Características de planta de compostaje de planta biorresiduos recogidos selectivamente



5. Selección y definición de categorías de impacto

La fase de evaluación del impacto en los estudios de ACV tiene por objeto evaluar la importancia de los impactos ambientales utilizando los resultados obtenidos en la etapa de inventario, y relacionándolos con diferentes categorías de impacto.

5.1. Categorías de impacto tradicionales

Siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN-ISO 14040-44 (2006), va a obtenerse indicadores ambientales para las categorías de impacto mostradas en la

Tabla 3, utilizando los factores de caracterización propuestos por el método CML (Guinee et al., 2001).

Tabla 3. Categorías de impacto y unidades consideradas

Categoría de impacto	Unidad
Efecto invernadero	kg CO ₂ eq
Destrucción de la capa de ozono	kg CFC-11 eq
Smog fotoquímico	kg C ₂ H ₂ eq.
Acidificación	kg SO ₂ eq
Eutrofización	kg PO ₄ eq

Estas categorías de impacto permiten obtener indicadores ambientales relacionados con las emisiones atmosféricas y al agua, producidos en las diferentes etapas del ciclo de vida de un sistema de gestión de residuos. Sin embargo, con el fin de adaptar los indicadores al caso de estudio, se considera necesario definir un nuevo indicador que evalúe el impacto del uso del suelo en la etapa de vertido.

5.2 Definición de la categoría “uso del suelo”

Generalmente, en los estudios de ACV, la categoría de impacto uso del suelo es interpretada únicamente como la demanda de espacio necesario para desarrollar la actividad en cuestión, no considerando la calidad del suelo que se ve afectado y los efectos negativos ocasionados por el desarrollo continuado de la actividad. La importancia de estos factores espacio-temporales al considerar el impacto de actividades industriales contrasta con la falta de consenso en este campo en la metodología de ACV. De hecho, actualmente no es posible encontrar un método ampliamente extendido que permita realizar una evaluación adecuada de la categoría de impacto uso del suelo (Milà i Canals et al., 2007), (Achten et al., 2009).

En general, se considera que para incorporar correctamente el uso del suelo en la metodología de ACV, el uso del suelo debería describirse en términos de cambio en la calidad del suelo, de área afectada y de duración del impacto ocasionado. Además, también existe un consenso general en el hecho de que se debe proporcionar una definición adecuada para los conceptos de “impacto debido al cambio” e “impacto debido a la ocupación”. En este trabajo, se plantea un método para evaluar la categoría de impacto del uso del suelo destinado a vertederos, considerando los aspectos destacados por autores como Milà i Canals et al. (2007) y Achten et al. (2009). Para la definición de la metodología, dichos autores emplean los conceptos de vegetación potencial natural (VPN), uso actual (UA) y uso proyectado (UP).

La VPN de un determinado suelo es la vegetación que se encontraría en ese suelo si previamente no hubiera existido ninguna intervención humana. Representa el máximo de calidad estructural y funcional de un ecosistema en una ubicación determinada. El UA es el uso que se viene realizando en una porción determinada de suelo en el momento en que el nuevo proyecto comienza. La calidad del suelo para el UA es habitualmente inferior a la calidad del mismo suelo en su estado de VPN, ya que actividades humanas han distorsionado previamente la evolución natural del suelo. El UP es el nuevo uso planeado para la porción de suelo objeto de estudio. El UP modificará el UA. La calidad del suelo para el UP puede ser tanto superior como inferior a la calidad del suelo para el UA, dependiendo de la naturaleza del cambio que se va a ocasionar.

En la presente investigación, el servicio de ecosistema empleado para evaluar la categoría será la biomasa superficial (BMS), que es la cantidad de material vegetal presente por unidad de área en una porción específica de terreno. La unidad de

medida de este servicio de ecosistema, que ya ha sido empleado por otros autores en estudios similares (Zheng et al., 2006), suele ser la tonelada de biomasa por hectárea (kgBMS/m^2). En el contexto de la presente investigación, la biomasa superficial resulta de utilidad debido a las características de funcionamiento de un vertedero, ya que sus distintas etapas de funcionamiento (construcción del vaso, almacenamiento de residuos, clausura, post-clausura), tienen influencia directa sobre el nivel de biomasa superficial presente en el área, produciéndose procesos de cambio y de ocupación de distinta naturaleza que afectarán de forma decisiva al funcionamiento de los ecosistemas afectados.

Se considera que el impacto debido al cambio (IC) y el impacto debido a la ocupación (IO) son independientes, debiendo calcularse de forma separada. En ambos casos, el impacto (I) se calcula mediante la fórmula $I = \text{área} \times \text{tiempo} \times \text{calidad}$. La unidad de medida del indicador es el kilogramo de biomasa superficial por año ($\text{kg}_{\text{BMS}} \cdot \text{año}$).

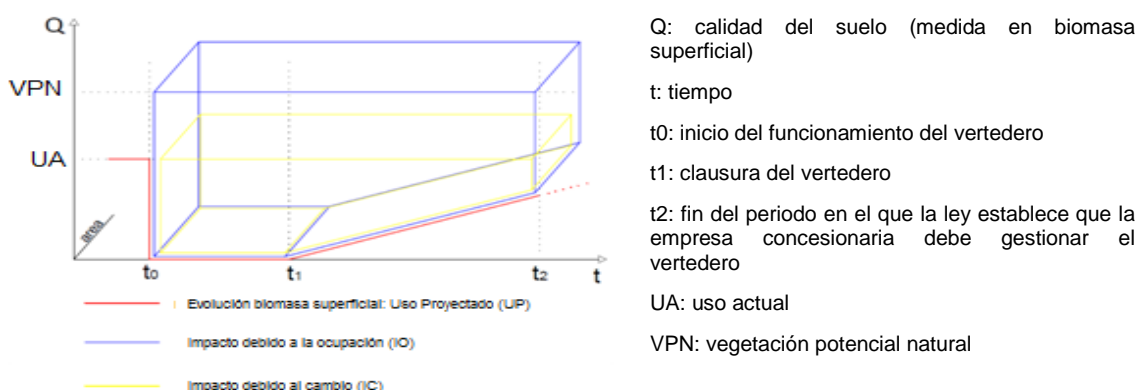
La componente de área (m^2) determina la superficie de suelo afectada por el funcionamiento del vertedero, y estará directamente relacionada con la cantidad de residuo entrante al mismo: $\text{área} = f(\text{toneladas residuos entrantes})$

La componente de tiempo (años) determina la duración del impacto. En la presente investigación se considera que el impacto atribuible al vertedero tiene una duración igual al tiempo que la empresa concesionaria debe gestionar el vertedero. Teniendo en cuenta la legislación española (RD 1481, 2001), este valor sería igual a 30 años.

Finalmente, la componente de calidad (kgBMS/m^2) determina las características del suelo afectado y estará relacionada con el tipo de vegetación presente en el lugar en que opera el vertedero. Si se está evaluando el impacto debido al cambio, la calidad se medirá como la diferencia entre la biomasa superficial en el uso actual (BMS_{UA}) y la biomasa superficial en el uso proyectado (BMS_{UP}); es decir: $\text{calidad} = \text{BMS}_{\text{UA}} - \text{BMS}_{\text{UP}}$. Si se está evaluando el impacto debido a la ocupación, la calidad se medirá como la diferencia entre la biomasa superficial en la vegetación potencial natural (BMS_{VPN}) y la biomasa superficial en el uso proyectado (BMS_{UP}); es decir, $\text{calidad} = \text{BMS}_{\text{VPN}} - \text{BMS}_{\text{UP}}$.

De modo orientativo, el valor del impacto debido al cambio (IC) y el impacto debido a la ocupación (IO) se pueden asemejar respectivamente al volumen de los prismas amarillo y azul de la figura 5. La línea roja representa la evolución del nivel de biomasa superficial en las distintas fases de funcionamiento de un vertedero, con lo que equivale al uso proyectado en cada instante.

Figura 5. Interpretación de la categoría de impacto uso del suelo



6. Desarrollo de la herramienta de integración ACV-GIS

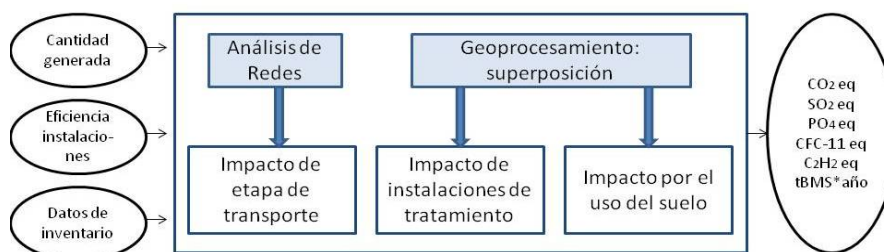
Un SIG es un software que permite gestionar, analizar, modelar y representar información que se encuentra referenciada espacialmente (Steiniger y Hay, 2009). En

este trabajo, la integración ACV-SIG persigue aprovechar las herramientas de búsqueda, transformación de información geográfica, cálculo y representación que ofrecen los SIG, con el fin de obtener las categorías de impacto propias del ACV, y aplicarlo al caso práctico de evaluar desde el punto de vista ambiental, diferentes escenarios de gestión de residuos.

Para ello, en el entorno del SIG se ha empleado *Model Builder* (ESRI, 2006), una aplicación que permite encadenar herramientas de geoprocésamiento, de manera que la información derivada de un proceso se convierte de forma automática en la información de entrada del siguiente proceso, automatizando operaciones y reduciéndose por tanto el tiempo necesario para realizar tareas rutinarias.

Mediante las funcionalidades que ofrecen los software SIG, se trata de automatizar al máximo el conjunto de procedimientos necesarios para la evaluación del impacto de ciclo de vida de un sistema de gestión de residuos, de modo que resulte sencilla y rápida la comparación entre distintos escenarios (Figura 6).

Figura 6. Esquema de integración ACV-SIG



7. Caso de aplicación

Tomando como caso de aplicación la gestión de residuos de un municipio del Plan Zonal 2 de la Comunidad Valenciana, se plantea analizar los escenarios A y B, considerando la actual situación del vertedero (Figura 7), y los escenarios B_i modificando su situación a 4 ubicaciones diferentes, dentro de las zonas aptas fijadas por la Consellería d'Infraestructures, Territori i Medi Ambient de la Generalitat Valenciana (2007) (Figura 8). Las zonas calificadas como aptas se encuentran fundamentalmente sobre bosques de coníferas (37.27%), transición bosque-arbusto (35.45%), vegetación esclerófila (11.38%), árboles frutales (5.69%) y olivares (0.67%) (CORINE, 2000).

Figura 7. Ubicación actual vertedero para escenarios A y B.

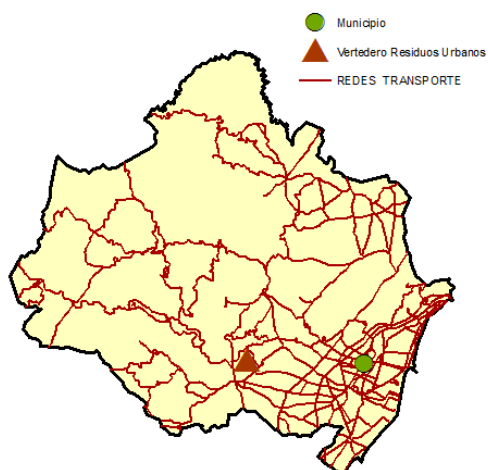
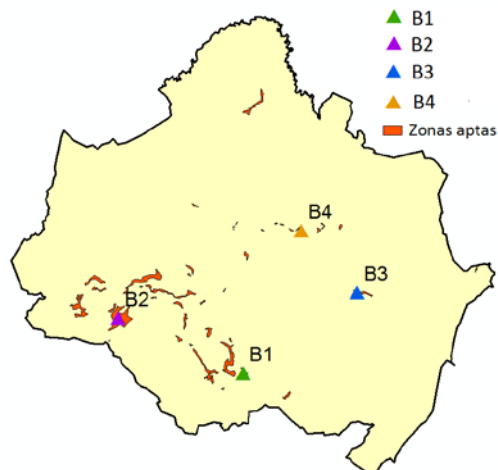


Figura 8. Zonas Aptas y ubicación planteada para vertederos de escenarios B_i



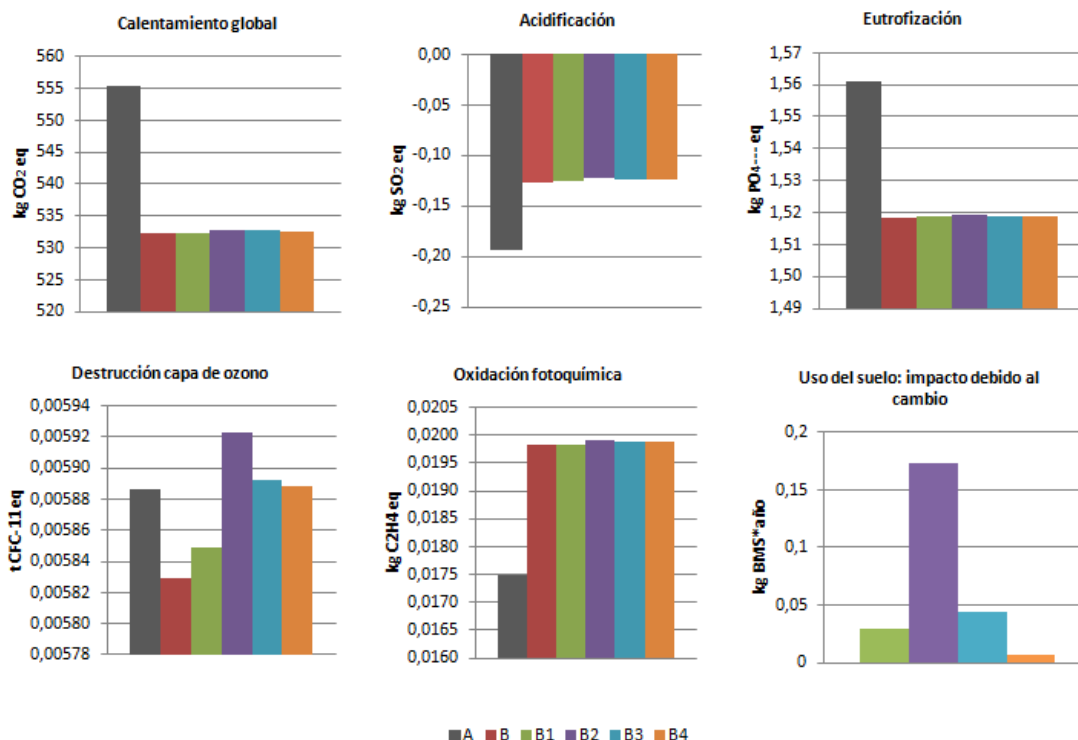
En el escenario B1, se plantea ubicar el nuevo vertedero en una localización cercana a la del vertedero actual (Figura 8). El uso del suelo actual en esa ubicación es cultivo de cítricos (Mapa de Cultivos de España, 2012), con lo que la biomasa superficial tiene un valor de 1,405 kg/m² (Ríos et al., 2008). Para el escenario B2, se selecciona una ubicación más alejada de la actual, en un área donde el uso del suelo actual es monte arbolado, con *Pinus halepensis* como especie predominante (Mapa Forestal del España, 2012), tomando un valor de biomasa superficial de 6,557 kg/m² (García et al., 2010). En el escenario B3, la ubicación seleccionada es un área de monte desarbolado en la que predominan los matorrales como el *Pistacia lentiscus*: 1.966 kg/m² (Navarro et al, 2006). Por último, en la ubicación elegida para el escenario B4 predomina el cultivo de olivar, con valores de biomasa superficial de 0.6 kg/m² (Petsikos et al, 2006).

Se considera que la vegetación potencial natural del área objeto de estudio es una combinación de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas (Casado y Ortega, 1991), con *Quercus ilex*, *Pistacia lentiscus* y *Hedysarum coronarium* como especies predominantes (Navarro-Cerrillo et al., 2006; Frame et al., 1998). El valor de biomasa superficial para la vegetación potencial natural es por lo tanto de 12,068 kg/m².

8. Resultados

Los resultados para las 6 categorías de impacto consideradas en el presente estudio se observan en la figura 9. La unidad funcional seleccionada ha sido la gestión de 1 tonelada de residuos urbanos con la composición mostrada en la Tabla 1.

Figura 9. Resultados de la evaluación de escenarios



8.1 Comparación Escenarios A y B

La comparación de los Escenarios A y B tiene como objeto evaluar la mejora ambiental que supone la implantación de la recogida selectiva de los biorresiduos para su posterior tratamiento en planta de compostaje.

Desde el punto de vista del calentamiento global, la implantación de la recogida selectiva de la materia orgánica resulta beneficiosa, aunque las reducciones de las emisiones de efecto invernadero son más bien bajas: un 4,3% de reducción global. Esta disminución se debe fundamentalmente a la reducción de las cantidades finales destinadas a vertedero (0.652 t. frente a 0.631 t.), que reducirán de manera importante las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O. Además, la fracción que verá disminuida en mayor medida su entrada a vertedero es la materia orgánica, que después de la fracción papel-cartón, es la que más contribuye al calentamiento global si se deposita en vertedero.

También tiene influencia, aunque en menor medida, la utilización en el Escenario B de la planta que produce compost a partir de biorresiduos recogidos selectivamente. Esta planta tiene menor consumo energético y produce más cantidad final de compost (que sustituirá la fabricación de fertilizantes artificiales), con lo que al extraer cierta cantidad de biorresiduos (8,01%) del flujo inicial de materia orgánica destinado a la planta de compostaje convencional, el rendimiento global del Escenario B mejora.

En menor medida influye también la reducción de la cantidad de residuos que debe ser tratada en estación de transferencia o planta de recuperación de materiales, ya que los biorresiduos recogidos selectivamente en el escenario B son destinados directamente a la planta de compostaje.

En relación a la acidificación del medio, ambos escenarios presentan resultados de carga evitada global, debido fundamentalmente a la contribución beneficiosa de los procesos de reciclaje de las fracciones vidrio, papel-cartón y metal no férnico. No obstante, el Escenario B supone una reducción del 35% de esta carga evitada.

La recogida selectiva del biorresiduo implica una ligera reducción en las cantidades recogidas de forma separada de las otras fracciones reciclables: papel-cartón, vidrio, plástico y metales. Esto provocará que las cantidades finales destinadas a reciclaje sean menores en el Escenario B que en el Escenario A, con lo que la acidificación del medio aumenta. Además, en el Escenario B se incrementan las cantidades totales destinadas a compostaje, tratamiento cuyas emisiones de CH₄ y NH₃ tienen importante contribución sobre esta categoría de impacto.

La reducción en la cantidad global destinada a vertido que supone el Escenario B no compensa los efectos perjudiciales que supone la reducción de las cantidades destinadas al reciclaje de metales, vidrio o papel-cartón.

En relación a la eutrofización del medio, esta se reduce en un 4% al implantar el Escenario B, debido fundamentalmente a la disminución global de la cantidad destinada a vertido. Las fracciones biorresiduo, papel-cartón, plástico o resto contribuyen de manera importante a esta categoría de impacto al ser depositadas en vertedero. Si se reducen las cantidades destinadas a este tratamiento, disminuyen las emisiones de NO₃, NH₃ y NO_x, y se obtiene por tanto un beneficio ambiental para esta categoría.

En cuanto a la destrucción de capa de ozono, el valor de la categoría se reduce en un 1% tras la implantación del Escenario B. Al igual que con categorías anteriores, la principal causa de esta reducción es la disminución de la cantidad final destinada a vertido, fundamentalmente la de la fracción biorresiduo, que es la que más contribuye sobre esta categoría al ser depositada en vertedero. El beneficio que aporta el tratamiento biológico en este caso es mínimo en comparación con la contribución medioambiental que supone la reducción de la cantidad vertida.

En relación a la oxidación fotoquímica, la implantación del Escenario B supone el aumento del 12% en el valor de esta categoría. En este caso, los tratamientos que tienen una mayor influencia sobre el resultado final son el reciclaje de los metales (especialmente metal no férnico), plástico y vidrio. Tal y como se ha comentado

previamente, la implantación de la recogida selectiva del biorresiduo implica cierta disminución de las cantidades de estas cantidades destinadas a reciclado. Esto provoca un aumento de las emisiones producidas en la fabricación de estos productos a partir de material virgen, que a su vez tiene consecuencias negativas sobre la categoría de impacto oxidación fotoquímica.

El tratamiento biológico aporta carga evitada sobre esta categoría, y esta es mayor al introducir el Escenario B. No obstante, la contribución beneficiosa que aporta el tratamiento biológico de los biorresiduos no es suficiente para compensar los efectos perjudiciales que supone destinar menos material para reciclado.

Comparación entre B1, B2, B3 y B4

La comparación de los escenarios B1, B2, B3 y B4 tiene como objeto evaluar las consecuencias ambientales que tiene el cambio de ubicación de un vertedero. Teniendo en cuenta tanto las nuevas distancias de transporte como el impacto que se ocasiona sobre el suelo se determinará el área más adecuada para la instalación de un nuevo vertedero.

Los escenarios B1, B2, B3 y B4 presentan resultados muy similares si se presta atención a las categorías de impacto previamente consideradas. La única diferencia de estos escenarios respecto del escenario B es la nueva ubicación del vertedero, con lo que las diferencias observadas tienen que ver con las nuevas distancias a recorrer por los vehículos para depositar los residuos. Atendiendo a estas diferencias, el escenario B2 sería el más desfavorable para las 5 categorías, al ser ésta la ubicación más alejada de las plantas de recuperación de materiales y de compostaje, instalaciones que destinan gran cantidad de sus residuos de entrada a vertido. De los escenarios planteados, el que minimiza las distancias de transporte y por lo tanto el impacto final es el B1, que plantea una ubicación del vertedero cercana al núcleo de generación y al resto de plantas de tratamiento.

No obstante, se debe tener en cuenta que la etapa de transporte tiene poco peso sobre el impacto total del escenario. Las variaciones observadas entre el escenario B y los escenarios B1 a B4 son poco significativas. Se recurre por tanto a la categoría de impacto uso del suelo para determinar la ubicación más adecuada.

El valor del impacto debido a la ocupación es el mismo para los cuatro escenarios: 0,328 kgBMS*año. Esto es debido a que la vegetación potencial natural es la misma para las cuatro ubicaciones planteadas.

No obstante, se observan diferencias importantes en relación al impacto debido al cambio. El escenario B2 es de nuevo el más desfavorable (0,173 kgBMS*año), ya que plantea la ubicación del vertedero en un área en la que actualmente predomina la especie *Pinus halepensis*, que presenta valores altos de biomasa superficial. El escenario B1 -que minimiza las distancias de transporte- presenta un menor valor de impacto debido al cambio (0,028 kgBMS*año), ya que plantea la ubicación en un área donde en la actualidad se encuentran cultivos de cítricos y se reduce por tanto la incidencia sobre la biomasa superficial. De los escenarios planteados, el que presenta un menor valor para el impacto debido al cambio es el B4 (0,006 kgBMS*año), por situarse sobre un área en la que actualmente predomina el olivar, vegetación que presenta valores bajos de biomasa superficial (0.6 kg/m²).

9. Conclusiones

- Mediante una metodología de integración ACV-SIG es posible evaluar el impacto ambiental de un sistema de gestión de residuos, incorporando la categoría de impacto uso del suelo para facilitar la ubicación de un nuevo vertedero.

- La implantación de la recogida selectiva del biorresiduo para su posterior compostaje supone un beneficio ambiental en 3 de las 5 categorías de impacto analizadas (efecto invernadero, eutrofización y destrucción de capa de ozono).
- La causa fundamental de la mejora en estas 3 categorías de impacto es la reducción de las cantidades globales destinadas a vertedero. El empleo de plantas de compostaje para residuos separados tiene poco peso sobre el impacto global.
- Mediante la categoría de impacto uso del suelo es posible seleccionar la ubicación más adecuada para un vertedero considerando el nivel de biomasa superficial del suelo. De los escenarios planteados, aquél que minimiza el impacto por el uso del suelo es el B4.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Fundación Caixa Castelló – Bancaixa y la Universitat Jaume I, la financiación obtenida para la realización de este estudio (P1·1B2008-49).

10. Referencias

Achten, W., Mathijs, E. & Muys, B. (2009). Proposing a life cycle and land use impact calculation methodology. *6th International Conference on LCA in the Agri-Food sector*. Zurich.

Bernad-Beltrán, D., Bovea, M.D., Gallardo, A. & Colomer, F.J. (2010). Análisis Comparativo de herramientas de análisis de ciclo de vida aplicadas a evaluación de sistemas de gestión de residuos urbanos. *III Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. México.

Casado, S. & Ortega, A. (1991). El bosque mediterráneo. *Acción Divulgativa*.

CORINE (2000). Agencia Europea de Medio Ambiente. <http://www.eea.europa.eu>

Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. Diario Oficial de la Unión Europea, L 312 pp 3-30

Ecoinvent (2008). Ecoinvent Data v2. Ecoinvent Centre, Swiss Centre for Life Cycle Inventory.

ESRI (2006). *Using ArcGIS Desktop*. Esri.

European Commission DG Environment (2011). Assessment of feasibility of setting biowaste recycling targets in EU. <http://ec.europa.eu/environment/waste/compost/>

Frame, J., Charlton, J.F.L., & Laidlaw, A.S. (1998). *Temperate Forage Legumes*. Wallingford: CAB International.

García, M., Riaño, D., Chuvieco, E. & Danson, F. (2010). Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 816-830.

Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; Huijbregts, M.A.J. (2001). *Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Boletín Oficial del Estado.

Mapa de cultivos de España 2000-2009. Geoportal del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España. <http://www.magrama.gob.es>

Mapa Forestal de España. Geoportal del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España. <http://www.magrama.gob.es>

Milà I Canals, Ll., Bauer, C., Depestele, J., Dubreuil, A., Knuchel, R., Gaillard, G., Michelsen, O., Müller, Wenk, R & Rydgren, B. (2007). Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA. *International Journal of Life Cycle Analysis*, 12, 5-15.

Navarro, R.M., & Blanco, P. (2006). Estimation of above-ground biomass in shrubland ecosystems of southern Spain. *Investigación Agraria: Sistemas de Recursos Forestales*, 15, 197, 207.

Petsikos, C., Dalias, P. & Troumbis, A. (2006). Effects of *Oxalis pes-caprae* L invasion in olive groves. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 120, 325-329.

PIR10. Revisión y Actualización del Plan Integral de Residuos Comunidad Valenciana (2010). Documento de Síntesis. *Dirección General del Cambio Climático*. <http://www.cma.gva.es>

Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. 2002. *Boletín Oficial del Estado*.

Plan Nacional Integral de Residuos 2008-2015. 2009. *Boletín Oficial del Estado*.

Ríos, J., Bastos da Veiga, J. & Cordeiro de Santana, A. (2008). Quantificação do carbono em sistemas de uso-da-terra no distrito de José Crespo e Castillo, Perú. *Asociación Latinoamericana de Producción Animal*, 16, 139-152.

Conselleria d'Infraestructures, Territori i Medi Ambient (2007). Zonas aptas para vertederos de la Comunidad Valenciana. <http://cartoweb.cma.gva.es/>

Steiniger, S. & Hay, G. (2009). Free and open source geographic information tools for landscape ecology. *Ecological Informatics*, 4, 183-195.

The Biowaste Alliance. (2009). Need for biowaste legislation. *Proceedings of the Conference "Bio-Waste - Need for EU-Legislation?"* <http://www.biowaste.eu/>

UNE-EN ISO 14040-44 (2006). Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. *European Committee for Standardization*.

Zheng, G., Chen, J.M., Tian, Q.J., Ju, W.M. & Xia, X.Q. (2006). Combining remote sensing imagery and forest age inventory for biomass mapping. *Journal of Environmental Management*, 85, 616-623.

Correspondencia:

M^a Dolores Bovea Edo. Grupo Ingeniería de Residuos. INGRES. Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I de Castellón. Av Sos Baynat s/n E-12071 Castellón. España

Phone: +34 964 728112

Fax: + 34 964 728106

E-mail: bovea@uji.es

URL: <http://www.ingres.uji.es>