

## **PROPUESTA DE ÍNDICES DE CONVERSIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE LA HUELLA DE LOS RESIDUOS Y LOS VERTIDOS**

**Elena Marañón<sup>1</sup>**  
**Giovanna Iregui<sup>1</sup>**  
**Juan Luis Doménech<sup>2</sup>**  
**Yolanda Fernández-Nava<sup>1</sup>**  
**Mónica González<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente  
Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias.  
España.

emara@uniovi.es

<sup>2</sup> Autoridad Portuaria de Gijón. España.  
jdomenech@puertogijon.es

### **Resumen**

En este trabajo se establece una propuesta de índices de conversión que permita calcular la huella de diferentes tipos de residuos, tanto peligrosos como no peligrosos, y de los vertidos de aguas residuales. Los índices de conversión de los residuos se han obtenido considerando los consumos de energía, materias primas y combustibles requeridos para la gestión de cada tipo de residuo considerado. Para la obtención del índice de conversión de las aguas residuales vertidas a redes de alcantarillado se ha realizado un estudio en una depuradora de tamaño mediano con un tratamiento convencional (desbaste, desarenado-desaceitado, decantación y tratamiento biológico aerobio por lodos activos), considerando todos los consumos y gastos. En ambos casos, se ha tenido en cuenta la contrahuella derivada de las zonas verdes de las instalaciones.

El método de conversión presentado permite calcular la huella de cada residuo desglosado por categoría de ecosistema (impacto de la energía, de los materiales, de los servicios, del uso de suelo, del consumo de recursos o de la producción de desechos).

Esto permite solventar una de las principales críticas a la huella ecológica original, la cual estaba basada sólo en el impacto energético del tipo de material consumido.

**Palabras clave:** huella ecológica corporativa, huella del carbono, residuos, aguas residuales, índices de conversión

**Abstract:**

This study presents a proposal for conversion factors that allows the ecological footprint of different types of waste –both hazardous and non hazardous– and wastewater discharges to be calculated. The conversion factors for the wastes were obtained taking into account the energy consumptions, raw materials and fuels required to manage each type of waste. To obtain the conversion factor of wastewaters discharged into the sewers, a study was carried out at a medium-sized sewage plant employing conventional treatment (screening, degritting-degreasing, primary settling and aerobic biological treatment by active sludge), taking into account all the pertinent consumptions and expenses. In both cases, the counter footprint resulting from the green areas at the facilities was also taken into account.

The conversion method presented here allows the footprint of each waste to be calculated, broken down according to different ecosystem categories (energy, materials, services, land use, consumption of resources or waste production impact). This enables one of the main criticisms of the original ecological footprint to be addressed, namely that it was based on the energy impact of the type of material consumed.

**Keywords:** corporative ecological footprint, hazardous waste, wastewater, conversion factors

## **1 Introducción**

La huella ecológica es un indicador de sostenibilidad cada vez más utilizado para calcular el impacto ambiental de poblaciones (Tomashow, 1994; Wackernagel, 1998; Monfreda y col., 2004; Wackernagel y col. 2005; Wiedmann y Lenzen, 2006; Wiedmann y col., 2006; Tortajada 2007; Pon y col., 2007; Carballo y Villasante, 2008). En su concepción inicial la huella ecológica está vinculada a un determinado territorio, pues los protagonistas del cálculo son los habitantes del área estudiada, siendo su huella comparada con la superficie ecológicamente productiva de esa zona. No obstante, han surgido nuevas aportaciones que aplican la huella a otras realidades donde el territorio cede protagonismo, como su aplicación a las corporaciones (Lehni, 1999; Chambers y Lewis, 2006; Doménech, 2004a; Doménech, 2004b; Doménech, 2006; Wiedmann y col., 2007); pues en la medida en que existan consumos y generación de residuos, el análisis de la huella ecológica es lo suficientemente flexible como para ser aplicado en ámbitos diferentes. De este modo puede convertirse en una herramienta de gran utilidad para mejorar el comportamiento medioambiental de las corporaciones y como factor de competitividad.

La huella ecológica corporativa permite a cualquier empresa u organización medir su impacto ambiental expresado en hectáreas de superficie productiva o en emisiones equivalentes de carbono. Agrupa los recursos consumibles de una empresa en las cuatro categorías siguientes: energía, uso del suelo, recursos agropecuarios y pesqueros y, por último, recursos forestales. El consumo de energía se subdivide a su vez en seis subgrupos, siendo la generación de desechos uno de ellos.

La huella de los desechos se obtiene a través de la suma de las huellas parciales producidas por la generación de residuos, vertidos líquidos y emisiones. El método de Rees y Wackernagel (1996) únicamente desglosa la metodología de cálculo de los residuos no peligrosos, sin incluir residuos peligrosos ni aguas residuales o emisiones a la atmósfera distintas del CO<sub>2</sub>.

Con el fin de mejorar la metodología en el subgrupo de generación de desechos, en este trabajo se establece una propuesta de índices de conversión que permita calcular la huella de diferentes tipos de residuos y de los vertidos de aguas residuales.

Esta propuesta de índices de conversión permite, por un lado, adicionar una metodología de cálculo para la huella de los vertidos líquidos y los residuos peligrosos y, por otro, actualizar la metodología de cálculo de los residuos no peligrosos.

Los índices de conversión se han obtenido calculando la huella ecológica corporativa para el año 2006 en una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) y en una instalación de gestión y tratamiento de diferentes tipos de residuos. Una vez obtenidas las respectivas huellas se divide el valor obtenido por la cantidad de agua residual o de residuo tratado, según corresponda.

## **2 Metodología**

### *2.1 Vertidos líquidos*

Para establecer un índice de conversión para los vertidos líquidos, entendiendo como tales las aguas residuales vertidas por las empresas o cualquier organización a las redes de saneamiento para después ser tratadas en una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), se calcula la huella ecológica corporativa de una de estas estaciones y se divide entre el volumen de agua depurada en la EDAR, en un período determinado, obteniendo así la huella producida por metro cúbico ( $\text{m}^3$ ) de agua vertida.

Se han considerado todas las operaciones de tratamiento llevadas a cabo desde que el agua se vierte en la red de alcantarillado: pretratamiento (desbaste, tamizado, desengrasado), tratamiento primario (decantación) y tratamiento secundario (biológico aerobio mediante lodos activos). El agua tratada se vierte al mar a través de un emisario submarino. La EDAR es de tamaño medio, está dimensionada para un caudal máximo de entrada a pretratamiento de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  y un caudal medio de entrada a tratamiento biológico de  $1,59 \text{ m}^3/\text{s}$ , valores correspondientes a 330.000 habitantes equivalentes.

Para el cálculo de la huella ecológica del agua residual se ha utilizado la siguiente información:

- Consumo anual de energía, combustibles y agua
- Gasto anual de materiales y servicios
- Generación anual de residuos (residuos asimilables a urbanos y lodos de depuradora) y el coste de transporte a la planta de tratamiento de residuos
- Gastos de inversión (construcción depuradora y complementos), considerando un tiempo de amortización de 20 años.
- Hectáreas construidas y arboladas

Mediante el cálculo de la huella ecológica de la EDAR y la cantidad de agua tratada se obtienen los índices de conversión ( $IC_n$ ) iniciales por ecosistema para los vertidos líquidos, según la siguiente expresión:

$$IC_n = \frac{HE_n edar}{ar_T}$$

Donde  $HE_n edar$  es la huella ecológica de la EDAR en el ecosistema  $n$ , siendo  $n$ : energía fósil, tierra cultivable, pastos, bosque, terreno construido, mar y contrahuella; y  $ar_T$  es la cantidad de agua residual tratada ( $m^3$ ).

Los índices de conversión inicialmente calculados, con la primera versión de la huella ecológica corporativa (Doménech, 2006), solamente tenían en cuenta la huella de los residuos asimilables a urbanos (RSU) y no incluía lodos. Por ese motivo, en este trabajo se han recalculado estos índices introduciendo los índices de conversión obtenidos para los lodos de depuradora, de acuerdo con los datos obtenidos en la realización de los cálculos de las huellas de los diferentes tipos de residuos aquí considerados. Asimismo, se ha modificado el índice de conversión de los RSU inicialmente aplicado, adaptándolo al nuevo valor obtenido en este estudio.

Con los índices de conversión de la EDAR obtenidos anteriormente, se recalcula la huella de la planta de tratamiento de residuos, obteniéndose así nuevos índices de conversión para los residuos no peligrosos, pues se incluye la huella debida a la

generación y tratamiento de lixiviados de vertedero. Este procedimiento se realiza hasta que los valores de los índices obtenidos para ambas instalaciones no varíen ostensiblemente.

## 2.2 *Residuos*

Para establecer índices de conversión para los residuos generados por empresas o cualquier organización, se ha obtenido la huella ecológica corporativa de las plantas de tratamiento de los diferentes residuos considerados. Dividiendo las huellas entre la cantidad de cada residuo tratado (en toneladas), se calcula la huella unitaria para cada residuo gestionado.

Para el cálculo de la huella de los residuos se ha requerido la siguiente información de cada una de las plantas de tratamiento:

- Consumo anual de energía eléctrica, combustibles y agua
- Gasto anual en materiales, servicios y canon de saneamiento
- Pagos anuales a otras plantas para el tratamiento de los residuos generados
- Gastos de alquiler por el uso de las instalaciones
- Hectáreas construidas

No se ha tenido en cuenta el gasto por transporte desde las empresas o cualquier otro tipo de organización productora de los residuos hacia las instalaciones de tratamiento porque se entiende que este gasto lo contabilizan las empresas, en otras categorías de consumos, para obtener su huella ecológica.

La empresa de tratamiento de residuos estudiada cuenta, entre otras instalaciones, con un vertedero controlado de residuos urbanos en el que se aprovecha el biogás generado para la producción de energía eléctrica. No obstante, con el fin de obtener un índice de conversión que tenga una aplicación más general, se calcula la huella ecológica utilizando la cantidad total de energía eléctrica consumida, tanto la producida en las instalaciones como la que se compra a la empresa suministradora de energía.

Con respecto a las aguas residuales generadas en las instalaciones de tratamiento de los residuos y vertidas a la red de saneamiento, la cantidad se obtiene de dividir el valor pagado por el canon de saneamiento en las instalaciones entre el importe del gravamen aplicado a los usos industriales de carácter general. En Asturias, para el año 2006 era de 0,2977 €/por metro cúbico.

En relación con las instalaciones del centro de tratamiento de residuos, la empresa no dispone de los datos de costes de inversión en obras y equipos debido a que los propietarios de las instalaciones son los Ayuntamientos de Asturias. Por lo cual, el dato que se maneja en el cálculo de la huella de las distintas plantas es el pago de alquiler por el uso de las instalaciones.

El centro de tratamiento tiene una superficie total de 256 hectáreas, de las cuales el área construida es aproximadamente un 40 %. De cada una de las plantas se conoce el área construida pero no el área correspondiente a zona verde (prados, árboles...). Para el cálculo de la contrahuella se pondera el área de la zona verde para cada planta de acuerdo con el porcentaje de su área construida en relación del total.

A continuación se presenta la metodología de cálculo seguida para obtener los índices de conversión de tonelada de residuo a hectáreas tanto para residuos peligrosos como no peligrosos.

### 2.2.1 Residuos Peligrosos

Para la determinación de los índices de conversión de los residuos peligrosos se consideran los RPs más generados en España en los diversos sectores industriales y empresas de servicio, según los datos estadísticos del Instituto Nacional de Estadística de España (INE). Se elabora un listado que se afina con la información sobre los tratamientos de RPs que se realizan en estas instalaciones (Tabla 1).

Posteriormente se calcula la huella ecológica de cada una de las plantas por ecosistema  $n$ , siendo  $n$ : energía fósil, tierra cultivable, pastos, bosques, terreno construido, mar y contrahuella. Con éstos valores, la cantidad de residuos tratados y el tipo de gestión que se realiza con cada residuo, se obtienen los índices de conversión, como se explica a continuación.

<b>Tabla 1. Residuos peligrosos estudiados</b>	
<b>Tratamiento</b>	<b>Residuos</b>
Planta de aceites	Aceites usados
Planta de residuos MARPOL	Emulsiones agua/aceite (humedad > 10%)
Horno incinerador	Residuos sanitarios y biológicos Filtros de aceite Absorbentes usados (a)
Planta físico-química	Residuos ácidos, alcalinos o salinos Lodos de emulsiones de agua/aceites
Planta de solidificación-estabilización	Pinturas, barnices, tintas y residuos adhesivos Alquitranes y hollín Lodos de efluentes industriales Materiales mezclados e indiferenciados
Depósito de seguridad	Absorbentes usados (a) Envases contaminados por sustancias peligrosas (b) Pilas con mercurio
Transferencia a otros gestores	Aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) Disolventes usados Baterías de plomo y Ni-Cd Envases contaminados por sustancias peligrosas (b)

(a) Parte de los absorbentes usados se valoriza energéticamente y el resto se lleva al depósito de seguridad

(b) Los envases contaminados que no puedan ser tratados por otros gestores son llevados al depósito de seguridad.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE), COGERSA y elaboración propia.



### 2.2.1.1 Residuos gestionados en la planta de aceites

Los aceites usados se analizan, pretratan, almacenan y desclasifican, en su caso, como peligrosos, para posteriormente ser regenerados o valorizados energéticamente. En el centro de tratamiento se realiza la valorización energética, que se efectúa en los hornos de incineración ubicados dentro de sus instalaciones.

El cálculo de los índices de conversión de los aceites usados tiene en cuenta únicamente la huella de la planta de aceites, ya que el aceite pretratado sería considerado “materia prima”, tanto en el proceso de regeneración como en el de valorización energética, y, por tanto, la huella de estos procesos no sería contabilizable en la de los residuos.

$$IC_n = \frac{HE_n p.a}{r_{T p.a}}$$

Donde  $HE_n p.a$  es la huella ecológica de la planta de aceites en el ecosistema  $n$  y  $r_{T p.a}$  es la cantidad total de residuos tratados en la planta de aceites.

### 2.2.1.2 Residuos gestionados en la planta de MARPOL

A los residuos del convenio MARPOL, aquellos procedentes de embarcaciones, se les reduce la humedad a menos del 10% y posteriormente se envían a la planta de aceites.

- Emulsiones agua/aceite (humedad > 10%)

$$IC_n = \frac{HE_n m}{r_{T m}} + \frac{HE_n p.a}{r_{T p.a}}$$

Donde  $HE_n m$  es la huella ecológica de la planta de MARPOL en el ecosistema  $n$ , y  $r_{T m}$  es la cantidad total de residuos tratados (emulsiones agua/aceite) en la planta de MARPOL.

La huella relacionada con el tratamiento del agua retirada está incluida dentro de la huella de la planta de MARPOL, ya que en los gastos de esta planta se incluye el pago del tratamiento de dicha agua a la planta que lo realiza.

### 2.2.1.3 Residuos gestionados en horno incinerador

Los índices de conversión de los residuos valorizados energéticamente se calculan a través de la huella ecológica por tonelada de residuo del horno incinerador de acuerdo con las siguientes expresiones:

- Sanitarios y MER:

$$IC_n = \frac{HE_n h}{r_{Th}}$$

Donde  $HE_n h$  es la huella ecológica del horno incinerador en el ecosistema  $n$ , y  $r_{Th}$  es la cantidad total de residuos tratados en el horno.

- Filtros de aceite:

Para los filtros es necesario tener en cuenta adicionalmente la huella de la planta de clasificación de RP's

$$IC_n = \frac{HE_n c}{r_{Tc}} + \frac{HE_n h}{r_{Th}}$$

Donde  $HE_n c$  es la huella ecológica de la planta de clasificación de RP's en el ecosistema  $n$ ,  $r_{Tc}$  es la cantidad total de residuos clasificados en la planta de RP's, y  $r_f$  es la cantidad de filtros de aceite valorizados.

- Absorbentes usados:

Los materiales absorbentes tienen diversas composiciones químicas. Los que son de naturaleza orgánica pueden ser incinerados. Alrededor de un 30% de los absorbentes usados se someten a eliminación mediante incineración, mientras que el 70% restante se lleva a depósito de seguridad. Por ello, en el cálculo de la huella habrá que tener en cuenta además de la del horno, la de la planta de clasificación de RP's y la del depósito

de seguridad. De acuerdo con lo anterior, el índice de conversión se obtiene de la siguiente forma:

$$IC_n = \frac{HE_n c}{r_{Tc}} + \frac{HE_n h}{r_{Th}} \times \left( \frac{r_{a.h}}{r_{ab}} \right) + \frac{HE_n d}{r_{Td}} \times \left( \frac{r_{a.d}}{r_{ab}} \right)$$

Donde  $HE_n c$  es la huella ecológica de la planta de clasificación de RP's en el ecosistema  $n$ ,  $r_{Tc}$  es la cantidad total de residuos clasificados en la planta de RP's,  $HE_n h$  es la huella ecológica del horno incinerador en el ecosistema  $n$ ,  $r_{Th}$  es la cantidad total de residuos tratados en el horno,  $r_{a.h}$  es la cantidad de absorbentes enviados a horno,  $r_{ab}$  es la cantidad total de absorbentes gestionados,  $HE_n d$  es la huella ecológica del depósito de seguridad en el ecosistema  $n$ ,  $r_{Td}$  es la cantidad total de residuos tratados en el depósito, y  $r_{a.d}$  es la cantidad de absorbentes enviados a depósito de seguridad.

#### 2.2.1.4 Residuos gestionados en planta físico-química

Después del tratamiento de los residuos en la planta físico-química son llevados al depósito de seguridad; por lo cual, los índices de conversión se calculan de la huella ecológica de las dos plantas, como se indica a continuación.

$$IC_n = \frac{HE_n f.q}{r_{Tf.q}} + \frac{HE_n d}{r_{Td}}$$

Donde  $HE_n f.q$  es la huella ecológica de la planta físico-química en el ecosistema  $n$ ,  $r_{Tf.q}$  es la cantidad de residuos tratados en la planta físico-química,  $HE_n d$  es la huella ecológica del depósito de seguridad en el ecosistema  $n$ , y  $r_{Td}$  es la cantidad total de residuos tratados en el depósito.

#### 2.2.1.5 Residuos gestionados en planta de solidificación-estabilización

Al igual que los residuos tratados en la planta de físico-química, los residuos enviados a solidificación-estabilización posteriormente son llevados al depósito de seguridad. Por lo cual, los índices de conversión se calculan de la huella ecológica de las dos plantas, como se indica a continuación.

$$IC_n = \frac{HE_{n.s.e}}{r_{T.s.e}} + \frac{HE_{n.d}}{r_{T.d}}$$

Donde  $HE_{n.s.e}$  es la huella ecológica de la planta solidificación-estabilización en el ecosistema  $n$ ,  $r_{T.s.e}$  es la cantidad de residuos tratados por solidificación-estabilización,  $HE_{n.d}$  es la huella ecológica del depósito de seguridad en el ecosistema  $n$ , y  $r_{T.d}$  es la cantidad total de residuos tratados en el depósito.

#### 2.2.1.6 Residuos gestionados en el depósito de seguridad

Los índices de conversión de los residuos enviados a depósito de seguridad sin tratamiento previo, se calculan a través de la huella ecológica del depósito:

$$IC_n = \frac{HE_{n.d}}{r_{T.d}}$$

Donde  $HE_{n.d}$  es la huella ecológica del depósito de seguridad en el ecosistema  $n$ , y  $r_{T.d}$  es la cantidad total de residuos tratados en el depósito.

#### 2.2.1.7 Residuos enviados a otros gestores

Una parte de los residuos que se reciben en el centro de tratamiento es tratada por otros gestores. La huella ecológica del tratamiento de estos residuos se ha obtenido en función del coste pagado a los respectivos gestores. Los índices de conversión se calculan a través de la huella de cada residuo y la huella por tonelada de la planta de clasificación de RP's, como se indica a continuación.

$$IC_n = \frac{HE_{n.c}}{r_{T.c}} + \frac{HE_{n.r.g_x}}{r_{E.g_x}}$$

Donde  $HE_{n.c}$  es la huella ecológica de la planta de clasificación de RP's en el ecosistema  $n$ ,  $r_{T.c}$  es la cantidad total de residuos clasificados en la planta,  $HE_{n.r.g_x}$  es la huella ecológica del tratamiento del residuo  $x$  por otro gestor en el ecosistema  $n$ , y  $r_{E.g_x}$  es la cantidad del residuo  $x$  enviado a otro gestor.

En el caso de los envases contaminados por sustancias peligrosas, la expresión para calcular el índice de conversión debe incluir adicionalmente la huella del depósito de seguridad correspondiente, como se muestra a continuación:

$$IC_n = \frac{HE_n r \cdot g_x}{r_{E \cdot g_x}} + \frac{HE_n c}{r_{T \cdot c}} + \frac{HE_n d}{r_{T \cdot d}}$$

Donde,  $HE_n d$  es la huella ecológica del depósito de seguridad en el ecosistema  $n$ , y  $r_{T \cdot d}$  es la cantidad total de residuos tratados en el depósito.

### 2.3 Residuos no peligrosos

A diferencia de los residuos peligrosos, los residuos no peligrosos cuentan con una metodología de cálculo de su huella en el método actual de la Huella Ecológica Corporativa (primera versión). Para ello, se utiliza la intensidad energética de producción del material del que está fabricado el residuo, descontando el porcentaje de energía que puede recuperarse por reciclaje.

En el método actual, los residuos no peligrosos que tienen establecidos índices de conversión de toneladas de residuos a hectáreas son: papel y cartón; aluminio; metales magnéticos y chatarra; vidrio; plástico, oleosos y restos de hidrocarburos; orgánicos (alimentos), R.S.U., y escombros. Para estos residuos ( $x$ ), con excepción del papel y cartón, el índice de conversión se obtiene a través de la huella por “energía fósil” como se indica a continuación:

$$IC_{RNP_x} = \frac{IE_x}{p.ener} \times \left( 1 - \frac{\%rec_x}{100} \times \frac{\%rec.es_x}{100} \right) \times f.e.ener.fo$$

Donde  $x$  representa cada uno de los residuos no peligrosos,  $IE_x$  es la intensidad energética de producción del material del que está fabricado el residuo,  $p.ener$  es la productividad energética del residuo (se asume que es igual a la de los combustibles fósiles),  $\%rec_x$  es el porcentaje de reciclaje de  $x$ ,  $\%rec.es_x$  es el porcentaje estimado de disminución energética por utilizar materiales reciclados y,  $f.e.ener.fo$  es el factor de equivalencia de la energía fósil.

En el caso de los residuos de papel y cartón, a la huella por “energía fósil” hay que añadir la huella por “bosque”; por lo cuál, para obtener su índice de conversión hay que adicionarle la siguiente ecuación a la expresada anteriormente:

$$IC_{RNP_x} = \dots + \frac{1}{p.nat} \times \left( 1 - \frac{\%rec_x}{100} \times 0.8 \right) \times f.e.bos$$

Donde  $p.nat$  es la productividad natural del papel,  $\%rec_x$  es el porcentaje de reciclaje de  $x$  y,  $f.e.bos$  es el factor de equivalencia del bosque.

Con el objeto de actualizar la metodología de cálculo de los índices de conversión de los residuos no peligrosos, se procede a calcular la huella ecológica de cada una de las plantas de este tipo de residuos existentes en el centro de tratamiento por ecosistema  $n$ , siendo  $n$ : energía fósil, tierra cultivable, pastos, bosques, terreno construido, mar y contrahuella.

Las plantas de residuos no peligrosos son: las de clasificación de papel y cartón, envases y vidrio; la de residuos de construcción y demolición; la de compostaje de residuos orgánicos; el vertedero de residuos inertes y el vertedero de RSU con el tratamiento de los lixiviados y la captación de biogás. La metodología de cálculo utilizada en cada una de ellas se desglosa a continuación.

### 2.3.1.1 Residuos a las plantas de clasificación

En las plantas de envases ligeros y papel y cartón los índices de conversión ( $IC_n$ ) por ecosistema se obtienen a través de la huella de una tonelada de residuo gestionada en cada planta y de la huella del rechazo en el vertedero, según la siguiente expresión:

$$IC_n = \frac{HE_n pc}{r_C} + \frac{HE_n v}{r_{TV}} \times \left( \frac{r_R}{r_C} \right)$$

Donde  $HE_n pc$  es la huella ecológica de la planta de envases o de papel y cartón en el ecosistema  $n$ ,  $r_C$  es la cantidad de envases o papel y cartón clasificado en las plantas,  $HE_n v$  es la huella ecológica del vertedero,  $r_{TV}$  es la cantidad total de residuos enviados a

vertedero y,  $r_R$  es la cantidad de envases o papel y cartón no aprovechable que es enviado a vertedero.

Como en el caso del vidrio no se producen rechazos (material no aprovechable), su índice de conversión se obtiene únicamente de la huella de una tonelada de residuo en la planta de vidrio, según lo expresado por la primera parte de la ecuación anterior.

En el caso de los residuos de aluminio, metales magnéticos y plásticos, en esta propuesta se utilizará el índice de conversión de la planta de envases y no uno distinto para cada uno de ellos, ya que este índice refleja la huella del tratamiento de los residuos en lugar de la de producción del material.

En éstos índices de conversión no se ha contabilizado el transporte desde el centro de tratamiento hasta las empresas de reciclaje de cada uno de los residuos clasificados ni el tratamiento necesario para convertirlos en materia prima nuevamente, al considerar que eso forma parte de otro proceso (el proceso de fabricación del producto). A una empresa le interesará comprar materiales procedentes de reciclado ya que su huella ecológica será menor que si el producto procede de materias primas originales.

#### 2.3.1.2 Residuos de construcción y demolición

En el año de referencia de este estudio, 2006, se trataban aproximadamente un 57% de los residuos de construcción y demolición (RCDs) que llegaban a la planta y el resto se llevaba directamente al vertedero de inertes. Actualmente, de acuerdo con la nueva normativa, todos los residuos se llevan primero a la planta y posteriormente la fracción no aprovechable, aproximadamente el 20%, se envía al vertedero.

Los índices de conversión ( $IC_n$ ) por ecosistema se obtienen a través de la huella de una tonelada de residuo en la planta de construcción y demolición y la huella del rechazo enviado al vertedero, según la siguiente expresión:

$$IC_n = \frac{HE_n pcd}{r_{cd}} + \frac{HE_n vi}{r_{Tvi}} \times \frac{r_R}{r_{cd}}$$

Donde  $HE_n pcd$  es la huella ecológica de la planta de construcción y demolición en el ecosistema  $n$ ,  $r_{cd}$  es la cantidad de residuos enviados a la planta de construcción y demolición,  $HE_n vi$  es la huella ecológica del vertedero de inertes,  $r_{Tvi}$  es la cantidad de residuos enviados al vertedero de inertes, y  $r_R$  es la cantidad de residuos de construcción y demolición no aprovechables que son enviados a vertedero.

### 2.3.1.3 Residuos orgánicos valorizados mediante compostaje

Los residuos orgánicos que se envían a compostaje son residuos vegetales, estiércol y en menor medida, gallinaza. El cálculo del índice de conversión se obtiene de la huella ecológica de la planta de compostaje y de la cantidad de residuo orgánico recibido, según la siguiente expresión:

$$IC_n = \frac{HE_n p.com}{r_{org}}$$

Donde  $HE_n p.com$  es la huella ecológica de la planta de compostaje en el ecosistema  $n$ ; y  $r_{org}$  es la cantidad de residuos orgánicos compostados.

### 2.3.1.4 Residuos depositados en vertedero

Dentro de los residuos enviados a vertedero se encuentran los residuos urbanos y asimilables (RU), los residuos industriales no peligrosos y los lodos de depuradora. Para obtener su índice de conversión se utiliza la huella ecológica del vertedero de urbanos, incluida la de la captación de biogás y la del tratamiento de lixiviados, esta última ponderada entre los residuos que generan lixiviados y los totales.

La expresión a utilizar para calcular el índice general de los residuos que van a vertedero y generan lixiviados es la siguiente:

$$IC_n = \frac{HE_n v_c b + HE_n t.l \times \left( \frac{r_{vcl}}{r_v} \right)}{r_v}$$

Donde  $HE_n v_c b$  es la huella ecológica del vertedero con captación de biogás en el ecosistema  $n$ ,  $HE_n t.l$  es la huella ecológica del tratamiento de lixiviados en el



ecosistema  $n$ ,  $r_{vcl}$  es la cantidad de residuos al vertedero que generan lixiviados y  $r_v$  es la cantidad total de residuos enviados a vertedero.

### 3 Resultados y discusión

Para actualizar y complementar la metodología de cálculo de la huella de los desechos dentro del Método de la Huella Ecológica Corporativa se debe adicionar los valores de los índices de conversión por ecosistema al subgrupo de generación de desechos de la categoría de energía, para aplicarles la ecuación siguiente:

$$HE_n d_x = IC_n \times d_x$$

Donde  $HE_n d_x$  es la huella ecológica del desecho  $x$  en el ecosistema  $n$ ; siendo  $x$  cada uno de los residuos peligrosos, no peligrosos y vertidos;  $IC_n$  es el índice de conversión del desecho  $x$  en el ecosistema  $n$ ; y  $d_x$  es la cantidad de desecho  $x$  generado por la empresa u organización.

La anterior expresión también se debe utilizar para añadir el valor del índice de conversión relativo a la contrahuella de cada desecho  $x$ ,  $CH.d_x$ . La metodología de la Huella Ecológica Corporativa asigna exclusivamente a las zonas arboladas un valor para la absorción de  $CO_2$ . Por lo anterior, para incluir la reducción en emisiones de  $CO_2$  debida a la contrahuella sólo se tiene en cuenta la cantidad de zonas arboladas que tienen las instalaciones objeto de este estudio. En la celda de cruce de la columna contrahuella con la fila sub-total (t  $CO_2$ ) del Subgrupo de desechos se aplica la siguiente ecuación:

$$CH_{CO_2} d = \sum CH d_x \times a_{CO_2} d_x \times (1,42 * 3,6666 / 1,13868813052783)$$

Donde  $CH_{CO_2} d$  es la contrahuella de los desechos en toneladas de  $CO_2$ ;  $CH d_x$  es la contrahuella en hectáreas del desecho  $x$ , siendo  $x$  cada uno de los residuos peligrosos, no peligrosos y vertidos;  $a_{CO_2} d_x$  representa la relación de zonas arboladas de la contrahuella del desecho  $x$ ; y  $(1,42 * 3,6666 / 1,13868813052783)$  es el factor de conversión de hectáreas a toneladas de  $CO_2$  utilizado en la metodología de cálculo de la Huella Ecológica.

En las Tablas 2, 3 y 4 se presentan los valores de índices de conversión totales y por ecosistema obtenidos para los distintos desechos (residuos peligrosos, no peligrosos y aguas residuales) y el porcentaje a utilizar para el cálculo de la contrahuella de los desechos en toneladas de CO<sub>2</sub>. El valor total es la suma de los índices por ecosistema restando el valor de la contrahuella.

Los índices de los residuos no incluyen los costes de transporte de los residuos hacia las instalaciones de tratamiento. En los residuos peligrosos está justificada su no inclusión al ser obligatoria la recogida y traslado de este tipo de residuos a los centros de tratamiento por parte de las empresas. Por ello, estos costes están imputados como gastos en las empresas que producen estos tipos de residuos.

En el caso de los residuos no peligrosos, especialmente los asimilables a urbanos que se depositan en los contenedores municipales, en muchos casos los municipios suelen incluir los costes del transporte como tasas municipales, en el mismo recibo que el del consumo de agua. Debería incluirse el coste por recogida de residuos en el ítem de transportes del subgrupo servicios de la categoría energía. La huella calculada mediante la aplicación de los índices calculados en este trabajo representa, por tanto, la huella de la gestión de los residuos, excluyendo su transporte. No obstante, este aspecto debe ser objeto de posteriores estudios.

Como puede observarse en la Tabla 3, el cambio en la metodología de cálculo implica modificar la lista de residuos no peligrosos a considerar. La primera columna de la Tabla 3 señala el listado actual basado en intensidades energéticas de producción de materias primas (metodología de cálculo clásica) y la segunda columna indica el nuevo listado propuesto, basado en el tratamiento realizado a los residuos. Los residuos oleosos y restos de hidrocarburos se han considerado dentro de la categoría de aceites usados de los residuos peligrosos. Por otro lado, la chatarra no se ha considerado pues habitualmente se vende para ser usada como materia prima, sin realizar ningún tratamiento previo.

Los nuevos índices de conversión obtenidos mediante la metodología propuesta en este trabajo, son sin duda, bastante inferiores a los obtenidos según la metodología actual, basada en las intensidades energéticas de producción de materias primas.

En la Tabla 4 se presentan los índices obtenidos para las aguas residuales generadas que son vertidas a redes de alcantarillado. Estos índices se han obtenido, como se ha indicado, a través de datos de los consumos en una estación depuradora (convencional con vertido a mar a través de emisario submarino). Actualmente se acaba de realizar otro estudio en una depuradora con vertido final a río y que incluye, además de los tratamientos estudiados en la depuradora considerada en este estudio, una eliminación de nutrientes en su tratamiento biológico secundario. Se está realizando la comparación entre los datos de ambas depuradoras.

**Tabla 2. Índices de conversión de los residuos peligrosos**

Tabla 2. Índices de conversión de los residuos peligrosos									
RESIDUOS PELIGROSOS	Índice de conversión (ha/t)								total
	Energía fósil	Tierra cultivable	Pastos	Bosque	Terreno construido	Mar	Contrahuella		
							Total	%CO2	
Aceites usados	4,51x10 <sup>-2</sup>	0	4,48x10 <sup>-6</sup>	1,94x10 <sup>-4</sup>	7,34x10 <sup>-5</sup>	0	5,93x10 <sup>-5</sup>	77,27	4,53x10 <sup>-2</sup>
Emulsiones agua/aceite (humedad > 10%)	1,05x10 <sup>-1</sup>	0	2,62x10 <sup>-5</sup>	5,81x10 <sup>-5</sup>	1,33x10 <sup>-4</sup>	0	1,08x10 <sup>-4</sup>	77,27	1,05x10 <sup>-1</sup>
Ácidos, alcalinos o salinos	3,54x10 <sup>-2</sup>	0	3,80x10 <sup>-6</sup>	1,81x10 <sup>-3</sup>	4,90x10 <sup>-3</sup>	0	3,86x10 <sup>-4</sup>	77,37	4,17x10 <sup>-2</sup>
Sanitarios y MER	7,23x10 <sup>-1</sup>	0	9,79x10 <sup>-5</sup>	7,96x10 <sup>-3</sup>	3,01x10 <sup>-4</sup>	0	2,25x10 <sup>-4</sup>	77,53	7,31x10 <sup>-1</sup>
Filtros de aceite	7,44x10 <sup>-1</sup>	0	9,86x10 <sup>-5</sup>	9,46x10 <sup>-3</sup>	5,66x10 <sup>-4</sup>	0	4,34x10 <sup>-4</sup>	78,31	7,54x10 <sup>-1</sup>
Absorbentes usados	2,41x10 <sup>-1</sup>	0	3,05x10 <sup>-5</sup>	3,90x10 <sup>-3</sup>	3,76x10 <sup>-3</sup>	0	5,28x10 <sup>-4</sup>	78,09	2,48x10 <sup>-1</sup>
Pinturas, barnices, tintas y residuos adhesivos. Alquitranes y hollín. Lodos industriales (de procesos, tratamiento de efluentes, que contienen hidrocarburos). Materiales mezclados e indiferenciados	5,37x10 <sup>-2</sup>	0	4,32x10 <sup>-6</sup>	6,74x10 <sup>-4</sup>	5,18x10 <sup>-3</sup>	0	6,10x10 <sup>-4</sup>	77,32	5,90x10 <sup>-2</sup>
Pilas	5,02x10 <sup>-3</sup>	0	5,55x10 <sup>-7</sup>	1,14x10 <sup>-5</sup>	4,87x10 <sup>-3</sup>	0	3,59x10 <sup>-4</sup>	77,36	9,54x10 <sup>-3</sup>
Disolventes	3,39x10 <sup>-2</sup>	0	7,03x10 <sup>-7</sup>	1,51x10 <sup>-3</sup>	2,65x10 <sup>-4</sup>	0	2,09x10 <sup>-4</sup>	79,15	3,54x10 <sup>-2</sup>
Taladrinas	2,94x10 <sup>-2</sup>	0	7,03x10 <sup>-7</sup>	1,51x10 <sup>-3</sup>	2,65x10 <sup>-4</sup>	0	2,09x10 <sup>-4</sup>	79,15	3,10x10 <sup>-2</sup>
Baterías	4,81x10 <sup>-2</sup>	0	7,03x10 <sup>-7</sup>	1,51x10 <sup>-3</sup>	2,65x10 <sup>-4</sup>	0	2,09x10 <sup>-4</sup>	79,15	4,96x10 <sup>-2</sup>
Equipos electrónicos	1,27x10 <sup>-2</sup>	0	0	2,08x10 <sup>-4</sup>	3,30x10 <sup>-3</sup>	0	2,67x10 <sup>-3</sup>	77,27	1,35x10 <sup>-2</sup>
Envases (incluye metálicos)	2,42x10 <sup>-2</sup>	0	9,81x10 <sup>-7</sup>	1,51x10 <sup>-3</sup>	2,70x10 <sup>-3</sup>	0	3,88x10 <sup>-4</sup>	78,33	2,80x10 <sup>-2</sup>

**Tabla 3. Índices de conversión de los residuos no peligrosos**

RESIDUOS NO PELIGROSOS		Índice de conversión (ha/t)								
Categoría actual	Categorías propuesta	<i>Energía fósil</i>	<i>Tierra cultivable</i>	<i>Pastos</i>	<i>Bosque</i>	<i>Terreno construido</i>	<i>Mar</i>	<i>Contrahuella</i>		<i>Total</i>
								<i>Total</i>	<i>%CO<sub>2</sub></i>	
Residuos sólidos urbanos (R.S.U.)	Residuos urbanos y asimilables (incluye industriales no peligrosos y lodos de depuradora)	$1,46 \times 10^{-3}$	0	$6,05 \times 10^{-8}$	$2,56 \times 10^{-5}$	$1,68 \times 10^{-4}$	0	$1,36 \times 10^{-4}$	77,34	$1,52 \times 10^{-3}$
Orgánicos (alimentos)	Orgánicos (residuos de comida, residuos vegetales, estiércoles)	$2,42 \times 10^{-3}$	0	$3,26 \times 10^{-7}$	$2,47 \times 10^{-4}$	$3,18 \times 10^{-4}$	0	$2,57 \times 10^{-4}$	77,27	$2,73 \times 10^{-3}$
Papel y cartón	Papel y cartón	$4,33 \times 10^{-3}$	0	$2,77 \times 10^{-7}$	$1,43 \times 10^{-4}$	$1,20 \times 10^{-4}$	0	$9,67 \times 10^{-5}$	77,27	$4,50 \times 10^{-3}$
Aluminio Metales magnéticos Plástico	Envases ligeros (Plástico, latas, brik)	$3,68 \times 10^{-2}$	0	$3,25 \times 10^{-6}$	$6,70 \times 10^{-4}$	$6,99 \times 10^{-4}$	0	$5,65 \times 10^{-4}$	77,28	$3,76 \times 10^{-2}$
Vidrio	Vidrio	0	0	0	0	$4,49 \times 10^{-5}$	0	0	0,00	$4,49 \times 10^{-5}$
Escombros	Residuos de construcción y demolición	$6,33 \times 10^{-4}$	0	$8,88 \times 10^{-8}$	$2,84 \times 10^{-5}$	$2,28 \times 10^{-4}$	0	$1,84 \times 10^{-4}$	77,27	$7,05 \times 10^{-4}$

**Tabla 4. Índices de conversión de los vertidos**

VERTIDO LÍQUIDO	Índice de conversión (ha/m <sup>3</sup> )								
	<i>Energía fósil</i>	<i>Tierra cultivable</i>	<i>Pastos</i>	<i>Bosque</i>	<i>Terreno construido</i>	<i>Mar</i>	<i>Contrahuella</i>		<i>Total</i>
							<i>Total</i>	<i>%CO<sub>2</sub></i>	
Aguas residuales a red de saneamiento	$7,97 \times 10^{-5}$	0	$1,81 \times 10^{-8}$	$1,41 \times 10^{-6}$	$2,36 \times 10^{-5}$	0	$1,5 \times 10^{-6}$	98,40	$8,2 \times 10^{-5}$



#### **4 Discusión y conclusiones**

Para los residuos que son reutilizables, reciclables o valorizables energéticamente, se realiza una propuesta de índices de conversión basados en la huella producida por la clasificación y/o pretratamiento que hace el gestor de residuos. ¿Debería añadirse a esta huella la del tratamiento requerido para transformarlos de nuevo en materia prima? ¿Debería incorporarse en la metodología de cálculo una contrahuella en todos aquellos residuos que después del tratamiento son reutilizados bien como materia prima en algún proceso industrial o como fuente de energía? Aunque en principio pensamos que el beneficio debe cobrarlo la empresa que compra estos productos reciclados, tales aspectos están siendo objeto de análisis en la actualidad, pues también debería compensarse a la empresa que recicla con respecto a la que no lo hace. Sin embargo, ¿debería primarse también a la empresa que minimiza sus vertidos o a la que apaga las luces o los ordenadores al salir o a la que implanta una “oficina sin papeles”? ¿O más bien se deberían incluir todos estos aspectos entre las buenas prácticas ambientales que toda organización debería haber asumido hace ya mucho tiempo?

Se ha mejorado por tanto sustancialmente la actual metodología de cálculo de huella ecológica de los desechos. De los resultados obtenidos cabe destacar tres conclusiones principales:

1) Se muestran cuales son los residuos que más huella o impacto producen, permitiendo a las empresas establecer prioridades en sus planes de gestión de residuos. Entre los residuos no peligrosos, podemos establecer 4 grupos de mayor a menor impacto: a) envases ligeros; b) papel-cartón, orgánicos y RSU; c) residuos de construcción, residuos industriales no peligrosos y lodos de depuradora; y d) vidrio. Entre los residuos peligrosos, de mayor a menor huella tenemos: a) aerosoles vacíos, sanitarios-MER y aceites; b) pinturas, barnices, etc., emulsiones de agua y aceite, ácidos, disolventes, taladrinas y equipos electrónicos; c) envases contaminados, residuos de la combustión, de la construcción y minerales, filtros de aceite, absorbentes y baterías; y d) pilas.

2) Si aplicamos estos valores al cálculo de la huella ecológica de alguna de las empresas que utilizan la huella ecológica como indicador, como es el caso de la Autoridad Portuaria de Gijón (Doménech, 2006, 2007; Carrera *et al.*, 2006), destaca la escasa entidad del impacto de los desechos (menos del 5% de la huella total) en comparación con el resto de categorías, especialmente el consumo de materiales y de energía eléctrica (más de un 70%). Esto parece indicar que los sistemas de gestión ambiental de la inmensa mayoría de las empresas habrían enfocado mal sus prioridades. Sin obviar la importancia ambiental de la producción de desechos, se sugiere que los sistemas de gestión de determinadas organizaciones (fábricas, por ejemplo) incorporen los consumos de materiales y energía como aspectos altamente significativos, sobre todo con respecto a los efectos del cambio climático.

3) Por último, el método de conversión presentado muestra un hecho fundamental para el futuro de la huella ecológica corporativa como indicador de sostenibilidad y es que permite calcular la huella de cada residuo desglosado por categoría de ecosistema. Es decir, considera el impacto de la energía, de los materiales, de los servicios, del uso de suelo, del consumo de recursos (agua, papel, etc.) o de la producción de desechos. Esto permite solventar una de las principales críticas a la huella ecológica original, la cual estaba basada sólo en el impacto energético del tipo de material consumido (Anónimo, 2001). Se sugiere, por tanto, extender el método aquí empleado al resto de materiales contemplados en la hoja de cálculo, lo cual mejorará sustancialmente el método general. La retroalimentación continua que ello supondría, reforzaría el papel creciente de la huella ecológica como indicador del impacto real de nuestras actividades.

### **Agradecimientos**

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Empresa Municipal de Aguas de Gijón (EMA), al Consorcio para la Gestión de Aguas de Asturias (CADASA) y a la Compañía para la Gestión de los Residuos Sólidos de Asturias (COGERSA), por su colaboración en el suministro de los datos que nos han permitido obtener los índices de conversión para el cálculo de la huella ecológica.



## Referencias

Anónimo (2001). *La huella ecológica*. Parlamento Europeo. Dirección General de Investigación. Dirección A. Resumen de opciones y síntesis PE nº 297.571; marzo 2001. 10 pp.

Calvo, M. (2007). “La huella ecológica de Andalucía”. En *Seminario La Huella Ecológica en España*. 24 pp.

Carballo, A. y Villasante, C. S. (2008). “Applying physical input-output tables of energy to estimate the energy ecological footprint (EEF) of Galicia (NW Spain)”. En *Energy Policy*. Nº 36. pp. 1148-1163.

Carrera, G., Castanedo, J., Coto, P., Doménech, J. L., Inglada, V. and Pesquera, M. A. (2006). “The Ecological Footprint of Ports. A sustainability Indicator”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Washington, D.C. Nº 1963, pp. 71-75.

Chambers, N.; Lewis, K. (2001). “Ecological footprint analysis: Towards a Sustainability Indicator for Bussiness”, *Research Report Nº 65*. London, Association of Chartered Certified Accounts.

Consorcio para la Gestión de los Residuos Sólidos de Asturias (2006). *Informe Anual*. COGERSA.

Doménech, J. L. (2004a). “Huella ecológica portuaria y desarrollo sostenible”. En *Puertos*. Nº 114, pp. 26-31.

Doménech, J. L. (2004b) “La huella ecológica empresarial: el caso del puerto de Gijón”. En *Actas del VII Congreso Nacional de Medio Ambiente*. Madrid, 22-26 de noviembre de 2004(CD-ROM), 8 pp.

Doménech, J. L. (2006). “Guía metodológica para el cálculo de la huella ecológica corporativa”. En *Terceros Encuentros sobre Desarrollo sostenible y población; eumed.net*. Universidad de Málaga, 6-24 de julio de 2006, 46 pp.

Doménech, J. L. (2007). *Huella ecológica y desarrollo sostenible*. AENOR. Madrid, 2007, 400 pp.

Empresa Municipal de Aguas (2005). *Informe Anual*. EMA. Gijón. 23 pp.

Lehni M. (1999). “El medio ambiente como factor clave de competitividad”. En *Eco-eficiencia, los negocios en el próximo milenio*. Fundación Entorno. Madrid: pp 23-28.

Monfreda, C., Wackernagel, M. and Deumling, D. (2004). "Establishing national natural capital accounts based on detailed Ecological Footprint and biological capacity assessments". En *Land Use Policy*. Nº 21, pp. 231-246.

Pon, D., Calvo, M., Arto, I., Fernández, M., Martínez, S. y Planas, V. (2007). "Análisis preliminar de la huella ecológica en España. Informe de Síntesis". En *Seminario La Huella Ecológica en España*. Madrid: pp. 33.

Rees, W. y Wackernagel, M. (1996). *Our ecological footprint. Reducing human impact on Earth*. New Society Publishers. Canadá.

Tomashow, M. (1994). *Ecological identity: Becoming a reflective environmentalist*. MIT Press. Cambridge (Massachusetts, EEUU).

Tortajada, R. (2007). "Cálculo de la huella ecológica en la Comunidad Foral de Navarra, 1999-2003-2007". En *Seminario La Huella Ecológica en España*. Madrid: pp. 30.

Wackernagel, M. (1998). The "Ecological Footprint of Santiago de Chile". En *Local Environment*. Vol. 3 (1), pp. 7-25; (hoja de cálculo: <http://www.iclei.org/ICLEI/SANTIAGO.XLS>, último acceso, marzo/2005).

Wackernagel, M., Monfreda, Ch., Moran, D., Wermer, P., Goldfinger, S., Deumling, D. and Murray, M. (2005). "National Footprint and Biocapacity Accounts 2005: The underlying calculation method". En *Global Footprint Network*: pp. 10. ([www.footprintnetwork.org](http://www.footprintnetwork.org); último acceso, diciembre/2005).

Wiedmann, T. y Lenzen, M. (2006). "On the conversión between local and global hectáreas in Ecological Footprint analysis". En *Ecological Economics*. Nº 20.

Wiedmann, T., Minx, J., Barret, J. y Wackernagel, M. (2006). "Allocating ecological footprints to final consumption categories with input-output analysis". En *Ecological Economics*. Nº 56, pp. 28-48.

Wiedmann, T., Barret, J. y Lenzen, M. (2007). "Companies on the Scale: Comparing and Benchmarking the Footprints of Businesses". En *International Ecological Footprint Conference*. Cardiff. pp. 1-20.