

## LA HUELLA ECOLÓGICA DEL TRANSPORTE DE RESIDUOS EN LA PROVINCIA DE CASTELLÓN

Enrique Moliner<sup>(1)(P)</sup>

Carlos Muñoz<sup>(1)</sup>

Daniel Garraín<sup>(2)</sup>

Rosario Vidal<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de Ingeniería del Diseño (GID), Universidad Jaume I, Castellón, España

<sup>(2)</sup> Dpto. de Energía, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, España

### Abstract

One of the major problems of waste management in the province of Castellon is the shortage of treatment facilities and the unsuitable geographical distribution of existing facilities. This situation is contrary to the principles of self-sufficiency and proximity governing the correct waste management and leads to excessive transport costs, both economic and environmental.

An example of this situation can be noticed in the facilities of municipal solid waste (MSW). Most of these facilities have been filled and closed in recent years, but the construction of new facilities to replace them is delayed. Consequently, many MSW produced in the province of Castellón are transported to the province of Alicante.

In this study we use a Geographical Information System and we incorporate indicators of carbon footprint and ecological footprint to assess the environmental impact of transport of MSW in the province of Castellón. Thus, we evaluate the footprint of transporting MSW in the current scenario and future scenario –once the planned treatment facilities become operational– and we compare the results in order to determine the environmental impact caused by the delay in setting up new facilities in the province.

**Keywords:** *ecological footprint, carbon footprint, waste transport, municipal solid waste, environmental impact, Geographic Information System*

### Resumen

Uno de los principales problemas de la gestión de residuos en la provincia de Castellón es la escasez de instalaciones de tratamiento y la inapropiada distribución geográfica de las instalaciones existentes. Esta situación es contraria a los principios de autosuficiencia y proximidad que rigen la correcta gestión de residuos y deriva en costes de transporte excesivos, tanto económicos como medioambientales.

Un ejemplo de esta situación son las instalaciones de tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU). La mayoría de estas instalaciones se han colmado en los últimos años, mientras que la implantación de nuevas instalaciones para sucederlas está demorándose. Como consecuencia, muchos RSU originados en la provincia de Castellón son transportados hasta la provincia de Alicante.

En este estudio se utiliza un Sistema de Información Geográfica y se incorporan los indicadores de huella de carbono y huella ecológica para evaluar el impacto ambiental del transporte de RSU en la provincia de Castellón. Se evalúa la huella del transporte de RSU en el escenario actual y en el escenario futuro –cuando entren en funcionamiento las instalaciones de tratamiento previstas– y se comparan los resultados para determinar el impacto ambiental ocasionado por la demora en la implantación de nuevas instalaciones en la provincia.

**Palabras clave:** *huella ecológica, huella de carbono, transporte de residuos, residuos sólidos urbanos, impacto ambiental, Sistemas de Información Geográfica*

## 1. Introducción

Uno de los aspectos más alarmantes de la gestión de residuos en la provincia de Castellón es la escasez de instalaciones de tratamiento y la inapropiada distribución geográfica de las instalaciones existentes (Vidal et al., 2009). Esta situación es completamente contraria a los principios de autosuficiencia y proximidad por los que debe regirse la correcta gestión de residuos (MARM, 2008) y, además, deriva en unos costes de transporte excesivos, tanto en términos económicos como medioambientales y sociales.

El ejemplo más claro y preocupante de esta situación es el de las instalaciones de tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU). Actualmente, sólo opera una instalación autorizada de tratamiento de RSU en toda la provincia de Castellón, la planta de compostaje de Onda y su vertedero anexo, que da respuesta a un total de 45 municipios de las comarcas centrales, siendo los únicos que tratan sus basuras de acuerdo a la Ley de Residuos. El reciente cierre del vertedero de Villafranca del Cid, ubicado en el norte de la provincia, ha supuesto que un total de 27 municipios de las comarcas del norte se vean en la obligación de transportar sus basuras hasta Jijona (Alicante), que se encuentra a casi 300 kilómetros de distancia. El traslado de basuras hasta Alicante no es una novedad en la provincia de Castellón. El cierre de los vertederos de Cortes de Arenoso y Tales, en los años 2007 y 2008 respectivamente, ya provocó que 41 municipios de las comarcas del sur de la provincia optaran por trasladar los residuos hasta Villena (Alicante). Además, concurren una serie de municipios en el norte de la provincia que no disponían de instalaciones autorizadas próximas y que han venido destinando sus residuos a vertederos ilegales.

El origen de tal situación reside en la incapacidad de los municipios y sobre todo de la Generalitat Valenciana a la hora de ejecutar los Planes Zonales de Residuos de la Comunidad Valenciana (PZRCV, CMAAUV, 2001, 2002 y 2004), todos ellos con más de cinco años de vigencia. Los PZRCV dividen la provincia en un total de cinco zonas, para cada una de las cuales establecen las infraestructuras necesarias para garantizar la gestión correcta de los RSU (Figura 1).

La Zona PIR I abarca todo el norte de la provincia y le corresponde la implantación de una planta de tratamiento de RSU con su correspondiente vertedero. En el año 2002 se decidió que la planta de tratamiento se construiría en el municipio de Cervera del Maestre pero, desde entonces, se ha alternado la elección de emplazamientos debido a la ausencia de garantías totales sobre la protección del medio ambiente y al rechazo social. Finalmente, la construcción de la planta en Cervera del Maestre ya dispone de la autorización ambiental, aunque no ocurre lo mismo con el vertedero al que deben ir a parar los rechazos de esta planta.

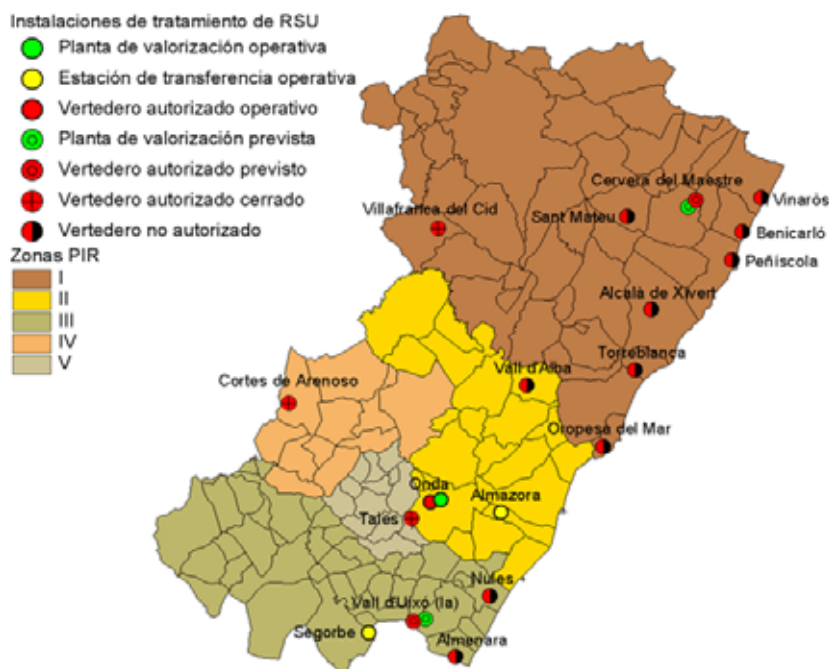
La Zona PIR II comprende la mayor parte de la zona central de la provincia, incluyendo la capital provincial, y es la única que tiene solucionado el servicio de gestión de RSU y ejecutadas sus infraestructuras. La basura originada en los municipios más poblados se compacta en la estación de transferencia de Almazora y, posteriormente, se traslada hasta

la planta de tratamiento de Onda. La planta de tratamiento y el vertedero de Onda han sido ampliados para acoger también los residuos generados en las Zonas PIR IV y V.

La Zona PIR III engloba todo el sur de la provincia y también le corresponde la implantación de una planta de tratamiento de RSU y un vertedero. En 2003 se decidió construir estas instalaciones en la Vall d'Uixó, sin embargo, se han sucedido toda una serie de problemas que implican que las infraestructuras no estarán finalizadas hasta dentro de dos años.

La demora en la construcción de todas estas instalaciones tiene unas repercusiones negativas muy importantes. Por un lado, se vierten de forma incontrolada, sin recibir ningún tratamiento previo, cerca de 70.000 toneladas anuales de RSU (en torno al 25% de los RSU de la provincia). Por otro lado, más de 50.000 toneladas anuales de RSU (en torno al 18% de los RSU de la provincia) son trasladadas hasta la provincia de Alicante para recibir el tratamiento que les corresponde, con los consiguientes costes económicos e impactos ambientales y sociales derivados del transporte (Vidal et al., 2009).

**Figura 1: Zonas PIR e instalaciones de tratamiento de RSU**



## 2. Objetivos

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto ambiental del transporte de los RSU originados en la provincia de Castellón. El impacto ambiental se expresará mediante los indicadores de huella de carbono (emisiones anuales de CO<sub>2</sub>) y de huella ecológica (hectáreas de masa forestal necesarias para absorber las emisiones de CO<sub>2</sub>). Por un lado, se evaluará la huella del transporte de RSU en el escenario actual. Por otro lado, se evaluará la huella del transporte de RSU en el escenario futuro, una vez entren en funcionamiento las instalaciones de tratamiento de RSU previstas en los PZRCV (CMAAUV, 2001, 2002 y 2004). Finalmente, se compararán los resultados obtenidos para ambos escenarios. La finalidad de esta comparación es determinar el impacto ambiental ocasionado por la demora en la implantación de nuevas instalaciones que deben sustituir a las instalaciones cerradas durante los últimos años en la provincia.

### **3. Metodología**

En el presente estudio se aplica la metodología de la huella ecológica sobre el consumo de combustibles fósiles asociado al transporte de los RSU originados en la provincia de Castellón. Para la elaboración del estudio se utiliza un Sistema de Información Geográfica (GIS). A continuación se describen las etapas abordadas para el desarrollo del estudio.

#### **3.1. Elaboración de escenarios**

El desarrollo del presente estudio requiere una etapa previa de recopilación de información para conocer la configuración actual y futura de la gestión de residuos en la provincia de Castellón. En este sentido, es necesario conocer la generación de RSU en la provincia de Castellón y el destino que reciben.

##### **Generación de residuos**

Los datos sobre generación de RSU utilizados en el presente estudio se obtienen del “Mapa de Residuos de la provincia de Castellón” (Vidal et al., 2009). Este trabajo proporciona un inventario de los residuos producidos en cada municipio de la provincia de Castellón en el año 2008, considerando diferentes categorías de residuos entre las que se incluyen los RSU. Los datos de generación anual de RSU extraídos del “Mapa de Residuos de la provincia de Castellón” se utilizan para modelar tanto el escenario actual como el escenario futuro. Aunque existe una tendencia creciente del aumento del consumo, se parte de la hipótesis de que la generación de residuos se mantendrá constante para el periodo 2005-2020, como consecuencia de la aplicación de las políticas de reducción en la generación de residuos y de recogida separada de residuos (CMAAUV, 2010). En cualquier caso, dado que el objetivo del estudio es comparar el impacto del transporte de RSU en el escenario actual y en el escenario futuro, no tiene sentido suponer una generación de RSU diferente para cada escenario.

##### **Instalaciones de tratamiento de residuos**

El “Mapa de Residuos de la provincia de Castellón” (Vidal et al., 2009) también proporciona información sobre la gestión ambiental –integrada por la recogida, transporte y tratamiento– que reciben actualmente los RSU originados en la provincia de Castellón. Por otro lado, los PZRCV (CMAAUV, 2001, 2002 y 2004) y el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana 2010 (PIR10, CMAAUV, 2010) describen las instalaciones de tratamiento de RSU previstas para el futuro. En base a estas fuentes se determinan las instalaciones de tratamiento de RSU –incluyendo estaciones de transferencia, plantas de valorización y vertederos autorizados– que operan actualmente y las que operarán en el futuro. De este modo, se determina la localización geográfica de estas instalaciones y se establece a qué municipios de la provincia de Castellón prestan servicio en la actualidad y/o prestarán servicio en el futuro cada una de ellas.

##### **Logística del transporte de residuos**

Para el desarrollo del estudio se considera que la recogida de RSU se efectúa diariamente en todos los municipios de la provincia de Castellón. Además, se suponen dos vehículos de referencia para el transporte de RSU: un vehículo compactador que realiza la recogida intramunicipal y el transporte hasta la estación de transferencia o planta de tratamiento, según corresponda; y otro vehículo de mayor capacidad que realiza el transporte desde la estación de transferencia hasta la planta de tratamiento (Tabla 1).

Considerando la carga útil de estos vehículos, se asigna el número de camiones de recogida de residuos (vehículo 1) que requiere cada municipio en base a su generación media diaria de RSU. En aquellos municipios donde la generación diaria de RSU no alcanza a cubrir la capacidad de un camión se realiza una recogida mancomunada. Es decir, un mismo camión

recorre varios municipios cercanos realizando la recogida de RSU y, finalmente, los transporta hasta la instalación de tratamiento correspondiente. En este caso, se asigna la fracción relativa de camión (vehículo 1) que le corresponde a cada municipio.

Por otro lado, el transporte de RSU entre las estaciones de transferencia y las plantas de tratamiento se realiza a medida que se llenan los camiones-tráiler (vehículo 2) en las estaciones de transferencia. Es decir, un mismo camión carga RSU procedentes de varios municipios y, una vez cubierta su capacidad, los transporta hasta la planta de tratamiento. En este caso, se asigna el número de camiones-tráiler (vehículo 2) que requiere cada municipio en función de su generación anual de RSU y de la capacidad de estos vehículos.

**Tabla 1: Características de los vehículos de recogida y transporte de RSU**

	Vehículo 1	Vehículo 2
Operaciones	Recogida intramunicipal y transporte hasta estación de transferencia o planta de tratamiento	Transporte desde estación de transferencia hasta planta de tratamiento
Tipo de vehículo	Camión compactador rígido	Camión-tráiler articulado
Tipo de combustible	Diésel	Diésel
Capacidad del contenedor (m <sup>3</sup> )	12,6	39
Peso en vacío (kg)	8.880	19.865
Peso de carga útil (kg)	5.500	20.135
Peso bruto (kg)	14.380	40.000

### 3.2. Cálculo de las distancias recorridas por los vehículos

Una vez determinado el destino (intermedio y/o final) de los RSU originados en cada municipio, se determinan los recorridos que realizan los camiones encargados de la recogida y transporte. Para realizar esta labor se utiliza un GIS, que es un sistema para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión (NCGIA, 1990).

En este caso, se utiliza el software libre gvSIG y su extensión Redes para calcular las rutas óptimas que permiten ir desde un origen hasta un destino (y regresar) en el menor tiempo posible. Por lo tanto, el GIS se usa para resolver un problema de grafos donde se asigna un origen (municipio), unas paradas intermedias (otros municipios en el caso de recogida compartida entre varios municipios), un destino (instalación de tratamiento) y toda una red de caminos posibles (carreteras) con un coste asociado (velocidad). Para llevar a cabo estos cálculos se introduce en el GIS un mapa digital de los municipios de la provincia de Castellón y de las instalaciones de tratamiento de RSU actuales y previstas para el futuro. Asimismo, se introduce un mapa digital de carreteras, en el cual se distinguen tres tipos de carreteras y se les asigna una velocidad media para los camiones (Burón et al., 2004): autopistas y autovías (70 km/h), vías interurbanas (50 km/h) y vías urbanas (14 km/h).

Haciendo uso de la extensión Redes se identifican las rutas óptimas que realizan los camiones de recogida (vehículo 1), ya sea una ruta directa entre un municipio y una instalación de tratamiento o bien una ruta compartida a través de varios municipios antes de ir a parar a la instalación de tratamiento. Análogamente, se identifican las rutas óptimas que realizan los camiones-tráiler (vehículo 2) entre las estaciones de transferencia y las plantas de tratamiento. En ambos casos se determina y se contabiliza el recorrido de ida hasta la

instalación de tratamiento y el recorrido de vuelta hasta el origen, tanto para el escenario actual como para el escenario futuro. Por el contrario, no se contabiliza el recorrido de recogida de contenedores a nivel intramunicipal ni el transporte de los rechazos de las plantas de valorización hasta los vertederos anexos. En cualquier caso, estos recorridos y sus impactos ambientales asociados difieren muy poco entre ambos escenarios, de modo que no interfieren en la comparación.

### **3.3. Cálculo de la huella de carbono y de la huella ecológica**

Como resultado de las etapas anteriores se dispone de los siguientes datos: número de camiones de recogida y transporte de RSU (vehículo 1) utilizados anualmente por cada municipio, número de camiones-tráiler de transporte de RSU (vehículo 2) utilizados anualmente por cada municipio, y distancias recorridas por estos vehículos para ir desde su origen hasta su destino y regresar. A partir de estos datos se calculan los kilómetros totales recorridos por cada tipo de vehículo para dar respuesta a los RSU originados en cada municipio de la provincia de Castellón. Llegados a este punto, es posible calcular el consumo de combustible, las emisiones de CO<sub>2</sub> y la huella ecológica derivados del transporte de los RSU originados en la provincia de Castellón.

#### **Consumo de combustible**

Para calcular el consumo total de combustible asociado a cada municipio, se consideran unas ratios de consumo medio de Diésel de 0,249 litros por kilómetro para vehículos de tipo 1 y de 0,331 litros por kilómetro para vehículos de tipo 2 (Léonardi & Baumgartner, 2004).

#### **Emisiones de CO<sub>2</sub>**

Para calcular la huella de carbono de cada municipio se aplica una ratio de emisiones de CO<sub>2</sub> por litro de combustible consumido sobre los resultados de consumo de combustible asociados a cada municipio. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) esta ratio es del orden de 74.100 kilogramos por Terajulio de Diésel (IPCC, 2006), lo que equivale aproximadamente a 2,65 kilogramos de CO<sub>2</sub> por litro de Diésel consumido.

#### **Huella ecológica**

La huella ecológica, desarrollada por Wackernagel & Rees, es una herramienta que evalúa el impacto ecológico de la acción humana sobre el medio ambiente en términos de superficie de tierra necesaria para absorber tal impacto o sostener la producción o consumo de un bien por parte de un individuo o una comunidad (Wackernagel & Rees, 1995). La huella ecológica del consumo de combustibles fósiles se representa mediante la superficie forestal necesaria para absorber las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por dicho consumo.

Por lo tanto, para calcular la huella ecológica de cada municipio se parte de los resultados de emisiones de CO<sub>2</sub> asociados a cada municipio y se aplica una ratio de absorción de carbono por parte de la masa forestal. En general, esta ratio se estima en 5,21 toneladas de CO<sub>2</sub> absorbidas anualmente por cada hectárea de masa forestal (IPCC, 2001). Sin embargo, en el presente estudio se opta por emplear una ratio específica, que se valora en 3,7 toneladas de CO<sub>2</sub> absorbidas anualmente por cada hectárea de bosque mediterráneo (Tello, 2002).

Por último, las hectáreas de masa forestal requeridas para absorber el CO<sub>2</sub> asociado al transporte de los RSU producidos en cada municipio se comparan con las hectáreas de masa forestal disponibles en los municipios. Para determinar las superficies forestales se recurre al Proyecto CORINE Land Cover (CLC), llevado a cabo por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), que proporciona una base de datos de ocupación del suelo para el año 2000.

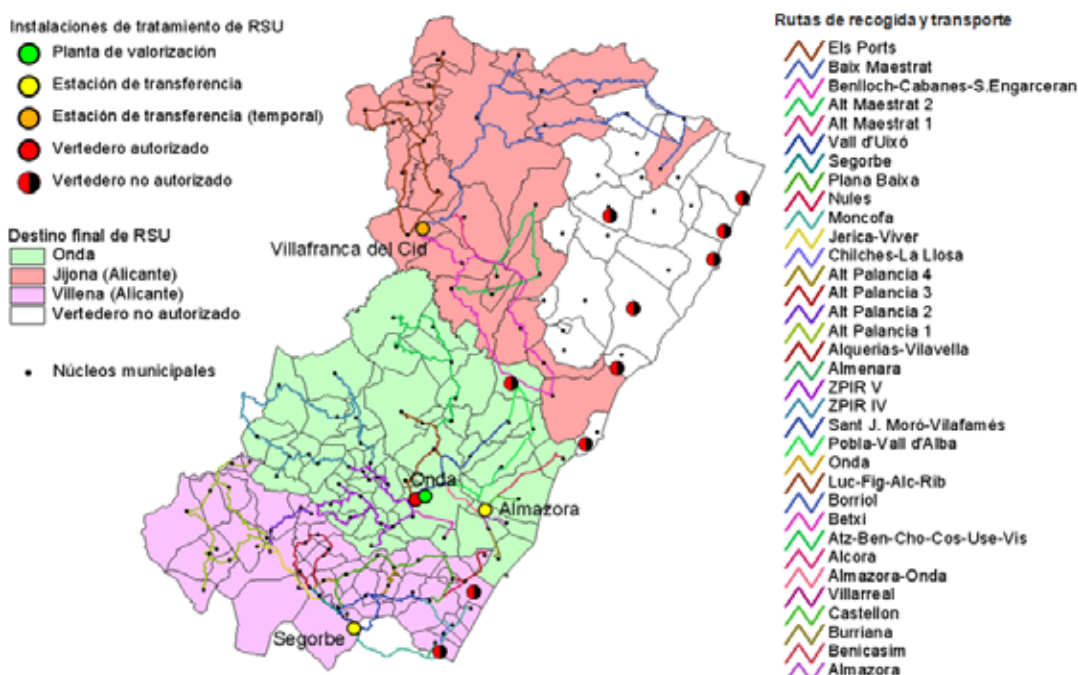


una estación de transferencia–, desde donde se transportan hasta Jijona en camiones-tráiler de mayor capacidad.

- Los municipios de la Zona PIR II (21 municipios) destinan sus RSU a la planta de valorización de Onda. Los municipios con mayor generación de residuos (Almazora, Benicasim, Burriana, Castellón de la Plana y Villarreal) hacen uso de la estación de transferencia de Almazora.
- Tras el cierre del vertedero autorizado de Tales, los municipios de la Zona PIR III (41 municipios) destinan sus RSU al vertedero autorizado de Villena (Alicante). Los camiones de recogida transportan los residuos hasta la estación de transferencia de Segorbe, desde donde se transportan hasta Villena en camiones-tráiler de mayor capacidad.
- Tras el cierre de los vertederos de Cortes de Arenoso y Tales, los municipios de la Zona PIR IV (11 municipios) y de la Zona PIR V (13 municipios) destinan sus RSU a la planta de valorización de Onda.

En la Figura 3 se muestra un mapa representativo del escenario actual de recogida y transporte de RSU en la provincia de Castellón. Este mapa incluye el destino final de los RSU generados en cada municipio y las rutas óptimas recorridas por los camiones de recogida y transporte de RSU; se incluyen tanto las rutas directas entre municipios e instalaciones de tratamiento como las rutas compartidas a través de varios municipios antes de ir a parar a las instalaciones de tratamiento.

**Figura 3: Escenario actual de recogida y transporte de RSU entre municipios y estaciones de transferencia o plantas de valorización**



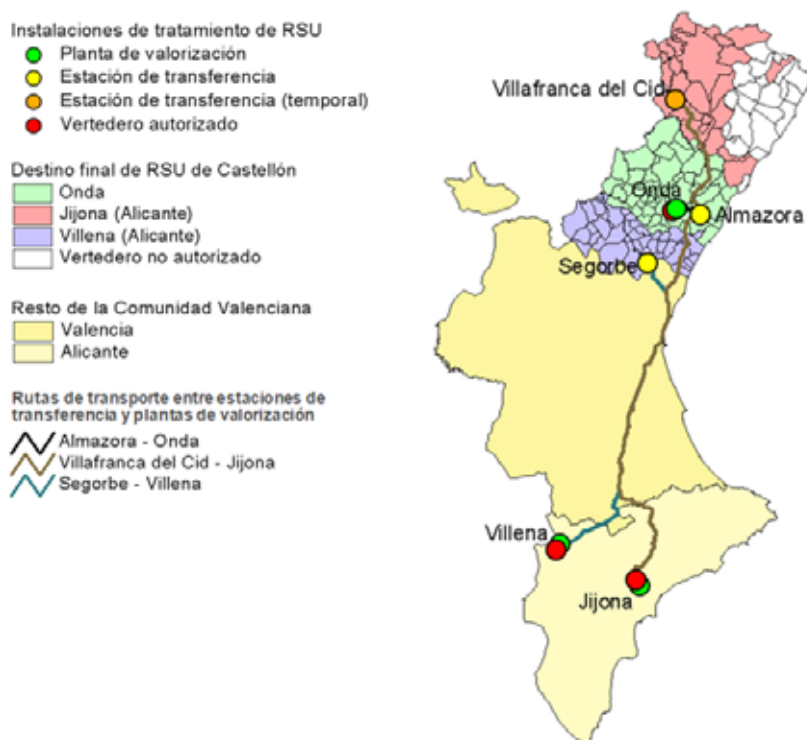
En la Figura 3 se observa que aún existen municipios en la Zona PIR I que siguen destinando sus RSU a vertederos ilegales (en total 22 municipios). Esto significa que cerca de 70.000 toneladas anuales de RSU no reciben ningún tratamiento previo de valorización y se eliminan de manera incontrolada. El impacto ambiental del transporte en estos casos no es demasiado preocupante, ya que los municipios que realizan el vertido incontrolado lo hacen en vertederos ilegales cercanos. No obstante, los riesgos ambientales asociados al



vertido incontrolado son numerosos: contaminación del suelo, agua y atmósfera; impacto sobre la biodiversidad y los ecosistemas; impacto paisajístico; agotamiento de los recursos naturales; y daños sobre la población (Strange, 2002). Estos municipios no han sido incluidos en la evaluación de la huella ecológica del transporte de RSU, debido a que se desconoce el destino concreto de sus residuos.

El escenario actual de transporte de RSU se completa con la Figura 4, donde se muestran las rutas óptimas recorridas por los camiones-tráiler entre las estaciones de transferencia y las plantas de valorización.

**Figura 4: Escenario actual de transporte de RSU entre estaciones de transferencia y plantas de valorización**



En la Figura 4 se observa que el transporte de RSU en la situación actual es especialmente crítico para los municipios de las Zonas PIR I y III. Por un lado, más de 8.600 toneladas de RSU generadas en la Zona PIR I son transportadas anualmente desde la estación de transferencia temporal de Villafranca del Cid hasta el vertedero de Jijona, recorriendo cada camión una distancia de 583,5 kilómetros (considerando ida y vuelta). Por otro lado, más de 43.800 toneladas de RSU generadas en la Zona PIR III son transportadas anualmente desde la estación de transferencia de Segorbe hasta el vertedero de Villena. En este caso, cada camión recorre una distancia total de 329,1 kilómetros (considerando ida y vuelta). Estos transportes interprovinciales de RSU, junto con el vertido incontrolado en algunos municipios, son los aspectos más problemáticos de la gestión actual de RSU en la provincia de Castellón.

Para determinar el impacto ambiental del transporte de RSU asociado a cada municipio de la provincia de Castellón se aplica la metodología de la huella ecológica. En la Tabla 2 se expone la aplicación de la metodología sobre el municipio de Castellón de la Plana, que constituye la capital provincial y es donde se producen mayores cantidades de RSU. Los cálculos mostrados en la Tabla 2 se efectúan también para el resto de municipios de la provincia de Castellón. Para simplificar esta tarea se utiliza el Sistema de Gestión de Bases

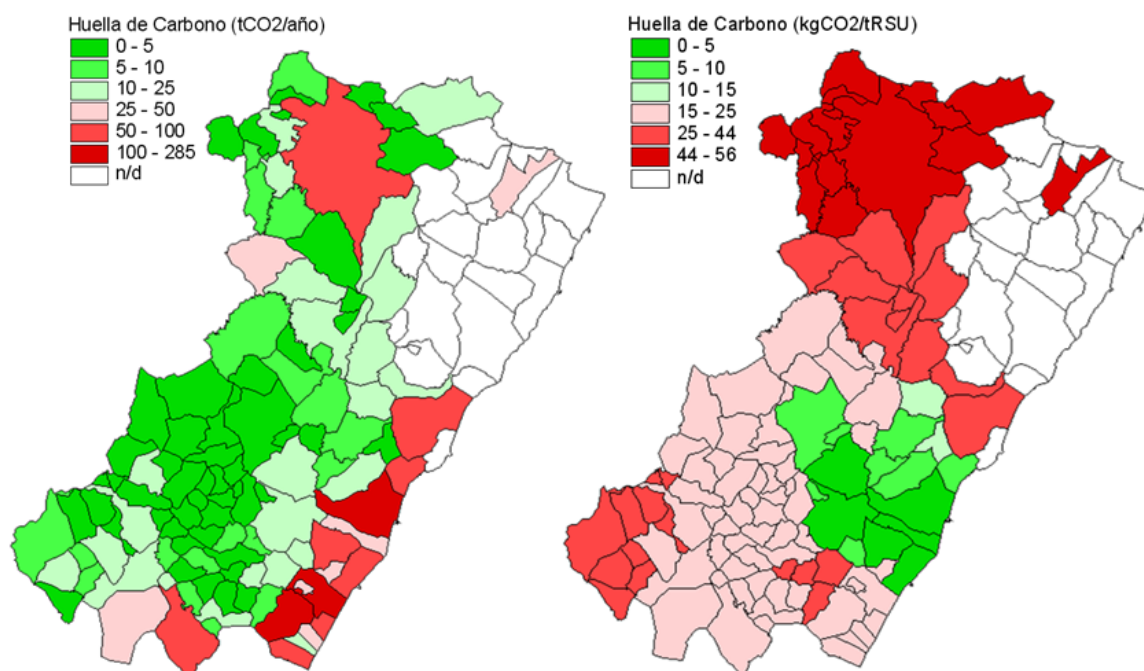
de Datos (SGBD) del software GIS (gvSIG), que permite trabajar con los datos de manera similar a una hoja de cálculo.

**Tabla 2: Aplicación de la metodología de la huella ecológica al transporte de RSU y resultados para el municipio de Castellón de la Plana**

Parámetro	Cálculo	Resultado
Generación anual de RSU: $RSU_a$ [t/año]	Obtenido de Vidal et al. 2009	72.066,46
Generación diaria de RSU: $RSU_d$ [t/día]	$RSU_d = RSU_a/365$	197,44
Estación de transferencia: ET	-	Almazora
Planta de tratamiento: PT	-	Onda
Vehículos tipo 1 diarios para transporte entre municipios y ET o PT: $NV1_d$ [veh./día]	Para municipios con ruta propia: $NV1_d = RSU_d/5,5$ ; redondeando al entero superior  Para un municipio j con ruta compartida entre n municipios: $NV1_d(j) = \frac{RSU_d(j)}{\sum_{i=1}^n RSU_d(i)}$	36
Vehículos tipo 1 anuales para transporte entre municipios y ET o PT: $NV1_a$ [veh./año]	$NV1_a = NV1_d \cdot 365$	13.140
Vehículos de tipo 2 anuales para transporte entre ET y PT: $NV2_a$ [veh./año]	$NV2_a = RSU_a/20$	3.603,323
Distancia recorrida por un vehículo tipo 1 en un desplazamiento (ida y vuelta): $DV1_u$ [km/veh.]	Obtenido mediante software GIS (gvSIG y su extensión Redes)	17,628
Distancia recorrida anualmente por el total de vehículos tipo 1: $DV1_a$ [km/año]	$DV1_a = NV1_a \cdot DV1_u$	231.631,920
Distancia recorrida por un vehículo tipo 2 en un desplazamiento (ida y vuelta): $DV2_u$ [km/veh.]	Obtenido mediante software GIS (gvSIG y su extensión Redes)	33,128
Distancia recorrida anualmente por el total de vehículos tipo 2: $DV2_a$ [km/año]	$DV2_a = NV2_a \cdot DV2_u$	119.370,884
Consumo anual de combustible: $CC$ [l/año]	$CC = 0,249 \cdot DV1_a + 0,331 \cdot DV2_a$	97.188,111
Huella de Carbono anual: $HC$ [kgCO <sub>2</sub> /año]	$HC = 2,65 \cdot CC$	257.548,494
Huella Ecológica anual: $HE$ [ha/año]	$HE = HC/3700$	69,608
Superficie forestal arbolada: $SFA$ [ha]	Obtenido de Proyecto CORINE Land Cover	1.036,32
Porcentaje de superficie forestal consumida: $SFC$ [%]	$SFC = HE/SFA \cdot 100$	4,77
Huella de Carbono por tonelada de RSU transportada: $HC_u$ [kgCO <sub>2</sub> /t]	$HC_u = HC/RSU_a$	3,574
Huella Ecológica por tonelada de RSU transportada: $HE_u$ [ha/t]	$HE_u = HE/RSU_a$	0,686e-04

En la Figura 5 se muestran los resultados de huella de carbono en los municipios de la provincia de Castellón en el escenario actual, tanto en términos absolutos como en términos relativos (respecto a las cantidades de RSU transportadas). Del análisis de estos resultados se desprende que los municipios con mayor generación de RSU (Figura 2) son los que producen mayor impacto ambiental en términos absolutos como resultado del transporte de residuos. Sin embargo, si se evalúan las emisiones de CO<sub>2</sub> en términos relativos, se observa que los municipios con mayor impacto ambiental por tonelada de RSU transportada pertenecen a la Zona PIR I, seguidos de los municipios de la Zona PIR III.

**Figura 5: Huella de carbono absoluta (tCO<sub>2</sub>/año) y relativa (kgCO<sub>2</sub>/tRSU) en el escenario actual de transporte de RSU**



Como era de esperar, los municipios que realizan transportes interprovinciales de residuos presentan mayor impacto ambiental relativo. No obstante, para dar una idea de la gravedad de esta situación basta con comparar los municipios de Castellón de la Plana y la Vall d'Uixó, pertenecientes a las Zonas PIR II y III respectivamente. Castellón de la Plana es el municipio con mayor generación de RSU con 72.066 toneladas anuales de RSU. Por su parte, la Vall d'Uixó genera 13.550 toneladas anuales de RSU (no llega al 19% de la generación de Castellón de la Plana). Sin embargo, la Vall d'Uixó se sitúa a la cabeza en cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte de RSU, con 281,2 toneladas anuales (20,75 kgCO<sub>2</sub>/tRSU) frente a las 257,5 toneladas anuales de Castellón de la Plana (3,57 kgCO<sub>2</sub>/tRSU). Este dato y otros tantos resultados derivados del estudio ponen de manifiesto que existe una necesidad urgente de mejorar la disponibilidad de instalaciones de tratamiento en la provincia de Castellón, empezando por las Zonas PIR I y III, puesto que son las más afectadas.

Finalmente, se presentan los resultados del estudio correspondientes al escenario actual agregados por Zonas PIR (Tabla 3). De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que las emisiones derivadas del transporte actual de los RSU originados en la provincia de Castellón ascienden a 2.111,362 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales, requiriéndose un total de 570,63 hectáreas de bosque mediterráneo para absorber tales emisiones.

**Tabla 3: Huella de carbono y huella ecológica en el escenario actual de transporte de RSU (agregado por Zonas PIR)**

Zona PIR	Municipios	RSU [t/año]	Huella de Carbono		Huella Ecológica	
			Absoluta [kgCO <sub>2</sub> /año]	Relativa [kgCO <sub>2</sub> /tRSU]	Absoluta [ha/año]	Relativa [ha/tRSU]
I	27	8.686,52	379.045	43,64	102,44	1,18e-02
I*	22	69.952,67	n/d	n/d	n/d	n/d
II	21	158.027,15	665.357	4,21	179,83	1,14e-03
III	41	43.840,80	985.215	22,47	266,27	6,07e-03
IV	11	2.522,34	46.947	18,61	12,69	5,03e-03
V	13	1.702,45	34.798	20,44	9,40	5,52e-03
Total	113	214.779,26	2.111.362	9,83	570,63	2,66e-03

\* Corresponde a los municipios que realizan vertido incontrolado; estos municipios no han sido contabilizados en el escenario actual y no aparecen reflejados en los resultados totales

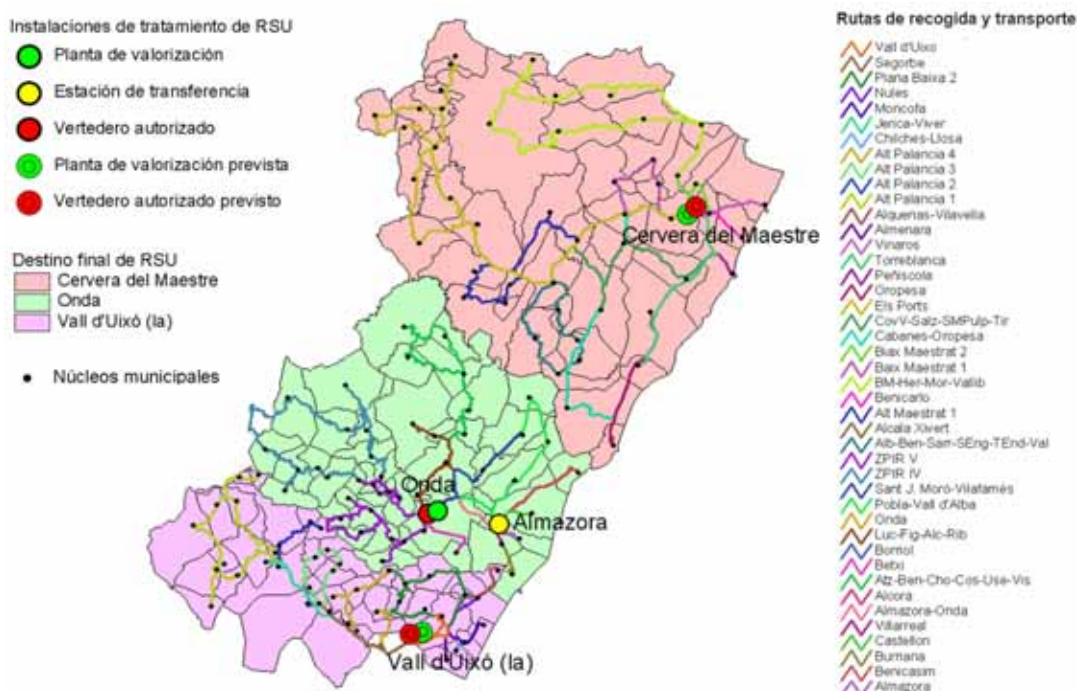
#### 4.2. Escenario futuro

La generación de RSU en el escenario futuro se considera idéntica a la del escenario actual (Figura 2), con la finalidad de comparar ambos escenarios bajo las mismas condiciones. Por el contrario, el destino de los RSU en el escenario futuro sí que presenta diferencias importantes respecto del escenario actual. De acuerdo a la planificación prevista en el Plan Integral de Residuos de la Comunitat Valenciana 2010 (PIR10, CMAAUV, 2010), los RSU originados en la provincia de Castellón tendrán los siguientes destinos:

- Todos los municipios de la Zona PIR I (49 municipios, incluyendo los que actualmente realizan el vertido incontrolado) destinarán sus RSU a la planta de valorización prevista en Cervera del Maestre. Además, esta planta dispondrá de un vertedero autorizado anexo para acoger los rechazos. El PIR10 no contempla la utilización de ninguna estación de transferencia en esta zona.
- Los municipios de las Zonas PIR II, IV y V (en total 45 municipios) destinarán sus RSU a la planta de valorización de Onda, tal y como hacen en la actualidad. Asimismo, la estación de transferencia de Almazora seguirá prestando servicio a los municipios con mayor generación de residuos (Almazora, Benicasim, Burriana, Castellón de la Plana y Villarreal).
- Los municipios de la Zona PIR III (41 municipios) destinarán sus RSU a la planta de valorización prevista en la Vall d'Uixó. Esta planta también dispondrá de un vertedero autorizado anexo para acoger los rechazos. El PIR10 no contempla la utilización de ninguna estación de transferencia en esta zona, de modo que la estación de transferencia de Segorbe cesará su actividad.

En la Figura 6 se muestra un mapa representativo del escenario futuro de recogida y transporte de RSU en los municipios de la provincia de Castellón. Este mapa incluye el destino final de los RSU generados en cada municipio y todas las rutas óptimas recorridas por los camiones de recogida y transporte de RSU.

Figura 6: Escenario futuro de recogida y transporte de RSU



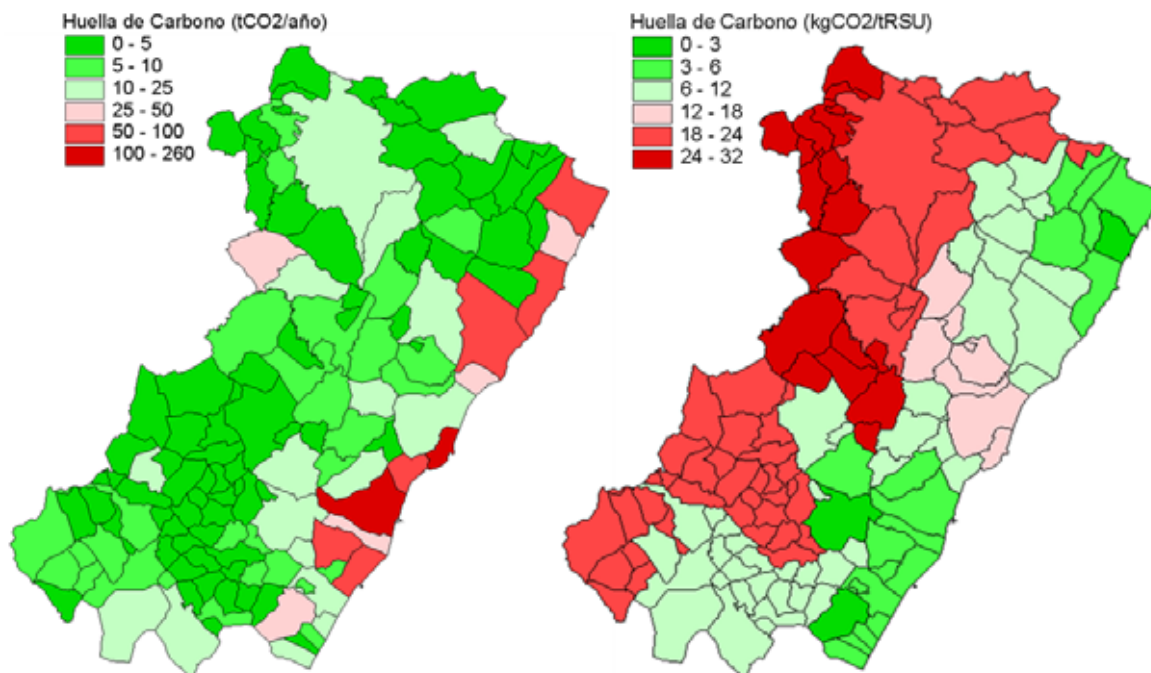
La implantación de las instalaciones de tratamiento previstas evitará que se sigan realizando transportes interprovinciales de RSU. Además, los municipios que hasta la fecha vienen eliminando sus RSU de manera incontrolada, dispondrán de una instalación de tratamiento autorizada cercana. Por lo tanto, el escenario futuro de instalaciones de tratamiento también es favorable en lo que se refiere a reducir la actividad en los vertederos ilegales.

Aplicando nuevamente la metodología de la huella ecológica se determina el impacto ambiental del transporte de RSU en el escenario futuro. En la Figura 7 se muestran los resultados de huella de carbono en los municipios de la provincia de Castellón en el escenario futuro, tanto en términos absolutos como en términos relativos (respecto a las cantidades de RSU transportadas). Los municipios con mayor generación de RSU (Figura 2) siguen siendo los que mayor impacto ambiental producen en términos absolutos como resultado del transporte de RSU. Por otro lado, los municipios de las Zonas PIR I y III experimentan una reducción considerable de su huella de carbono respecto del escenario actual, tanto en términos absolutos como relativos.

Si se comparan nuevamente los municipios de Castellón de la Plana y la Vall d'Uixó, se observa que el impacto relativo de ambos se encuentra ahora más equiparado: Castellón de la Plana genera 72.066 toneladas anuales de RSU, que derivan en 257,5 toneladas anuales de CO<sub>2</sub> (3,574 kgCO<sub>2</sub>/tRSU); mientras que la Vall d'Uixó genera 13.550 toneladas anuales de RSU, originando su transporte 39,5 toneladas anuales de CO<sub>2</sub> (2,92 kgCO<sub>2</sub>/tRSU).

Por último, analizando las emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada de RSU transportada, se observa claramente que los municipios con mayor impacto relativo están situados en la franja interior de la provincia. Estos municipios son los que se encuentran más alejados de las instalaciones de tratamiento previstas. Para reducir el impacto ambiental y los costes del transporte de RSU en los municipios del interior debería valorarse la posibilidad de implantar estaciones de transferencia en estas zonas.

**Figura 7: Huella de carbono absoluta (tCO<sub>2</sub>/año) y relativa (kgCO<sub>2</sub>/tRSU) en el escenario futuro de transporte de RSU**



Finalmente, se presentan los resultados correspondientes al escenario futuro agregados por Zonas PIR (Tabla 4). Las emisiones del transporte de RSU en toda la provincia de Castellón según el escenario futuro se estiman en 1.684,869 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales, requiriéndose un total de 455,37 hectáreas de bosque mediterráneo para absorber tales emisiones.

**Tabla 4: Huella de carbono y huella ecológica en el escenario futuro de transporte de RSU (agregado por Zonas PIR)**

Zona PIR	Municipios	RSU [t/año]	Huella de Carbono		Huella Ecológica	
			Absoluta [kgCO <sub>2</sub> /año]	Relativa [kgCO <sub>2</sub> /tRSU]	Absoluta [ha/año]	Relativa [ha/tRSU]
I	27	8.686,52	174.688	20,11	47,21	5,44e-03
I*	22	69.952,67	486.113	6,95	131,38	1,88e-03
II	21	158.027,15	665.357	4,21	179,83	1,14e-03
III	41	43.840,80	276.966	6,32	74,86	1,71e-03
IV	11	2.522,34	46.947	18,61	12,69	5,03e-03
V	13	1.702,45	34.798	20,44	9,40	5,52e-03
Total sin I*	113	214.779,26	1.198.756	5,58	323,99	1,51e-03
Total	135	284.731,93	1.684.869	5,92	455,37	1,60e-03

\* Corresponde a los municipios que actualmente realizan vertido incontrolado; se han contabilizado estos municipios por separado para facilitar la comparación de resultados con el escenario actual (donde estos municipios no han sido contabilizados).



### 4.3. Comparación de escenarios

Las emisiones derivadas del transporte de los RSU originados en la provincia de Castellón en el escenario actual<sup>1</sup> se estiman en 2.111,362 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales, requiriéndose 570,63 hectáreas de bosque mediterráneo para absorber tales emisiones. Los principales responsables de estas emisiones son los municipios de las Zonas PIR I, II y III (18,0%, 31,5% y 46,7% de las emisiones provinciales respectivamente). El impacto ambiental del transporte de RSU en la Zona PIR II se atribuye principalmente a las grandes cantidades de residuos transportadas, ya que la tasa de emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada de RSU transportada es de sólo 4,21 kgCO<sub>2</sub>/tRSU. En cambio, el impacto ambiental del transporte de RSU en las Zonas PIR I y III se atribuye en gran medida a las elevadas distancias que recorren los residuos hasta Alicante. Como consecuencia de estos transportes interprovinciales, las Zonas PIR I y III presentan unas tasas de emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada de RSU transportada mucho mayores, que se estiman en 43,64 y 22,47 kgCO<sub>2</sub>/tRSU respectivamente (Tabla 3).

En el escenario futuro se evitará el traslado de los RSU de las Zonas PIR I y III hasta Alicante, mediante la implantación de plantas de valorización y vertederos autorizados de RSU en la propia provincia. De este modo, según las estimaciones realizadas, las tasas de emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada de RSU transportada en las Zonas PIR I y III se reducirán aproximadamente en un 54 y 72% respectivamente. Consecuentemente, las emisiones absolutas de CO<sub>2</sub> en las Zonas PIR I y III se verán reducidas en esas mismas proporciones. Las emisiones derivadas del transporte de los RSU originados en la provincia de Castellón en el escenario futuro se estiman en 1.198,756 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales, requiriéndose un total de 323,99 hectáreas de bosque mediterráneo para absorber tales emisiones (Tabla 4).

Por lo tanto, la implantación de las plantas de tratamiento previstas permitirá reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte de RSU en algo más del 43%, evitándose 912,606 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales y liberándose 246,64 hectáreas de bosque mediterráneo.

## 5. Conclusiones

La mayoría de los vertederos autorizados de RSU que operaban en la provincia de Castellón han sido cerrados durante los últimos años. Sin embargo, las disputas entre los municipios y la incompetencia de las Administraciones provinciales y autonómicas han supuesto una demora en la implantación de las instalaciones de tratamiento previstas en los PZRCV (CMAAUV, 2001, 2002 y 2004). Como consecuencia, más de 50.000 toneladas de RSU anuales (en torno al 18% de los RSU de la provincia) son trasladadas hasta la provincia de Alicante para recibir el tratamiento que les corresponde. Esto no sólo ocasiona un sobrecoste considerable del transporte de residuos, sino que también tiene unas repercusiones medioambientales y sociales.

En el presente estudio se ha utilizado la metodología de la huella ecológica para determinar el impacto ambiental del transporte de los RSU originados en la provincia de Castellón, considerando dos escenarios distintos: el escenario actual, con una parte importante de los RSU destinándose a Alicante; y el escenario futuro –una vez entren en funcionamiento las instalaciones de tratamiento de RSU previstas en los PZRCV–, en el que ya no será necesario transportar RSU fuera de la provincia. Comparando los resultados obtenidos para ambos escenarios, se deduce que por cada año de demora en la implantación de las instalaciones previstas se producirá una emisión adicional de aproximadamente 912

---

<sup>1</sup> En los resultados del escenario actual no se contabilizan los municipios que realizan vertido incontrolado. A menos que se diga lo contrario, todos los resultados y comparaciones presentados en este apartado serán sin contabilizar estos municipios.

toneladas de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, se concluye la necesidad de implantar estas instalaciones cuanto antes, con vistas a reducir el impacto ambiental del transporte de RSU.

Además de reducir el impacto ambiental del transporte, las instalaciones de tratamiento previstas evitarán el vertido incontrolado en la provincia, que en la actualidad asciende a cerca de 70.000 toneladas anuales de RSU. Los municipios que a día de hoy eliminan sus RSU en vertederos ilegales dispondrán en el futuro de una instalación de tratamiento autorizada cercana.

Una vez entren en funcionamiento las instalaciones de tratamiento previstas, sólo los municipios del interior de la provincia podrían seguir encontrando ciertas dificultades para transportar sus residuos hasta las plantas de tratamiento, que estarán ubicadas sobre la franja litoral. Si bien es cierto que la generación de RSU en los municipios del interior es reducida, debería contemplarse la posibilidad de implantar estaciones de transferencia en estas zonas para reducir el impacto ambiental y los costes del transporte de residuos.

Por último, cabe destacar que en este estudio únicamente se han evaluado las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del transporte de residuos. Si al impacto ambiental de las emisiones de CO<sub>2</sub> añadimos el resto de externalidades del transporte –contaminación atmosférica, ruido, impacto del uso del suelo, accidentalidad y congestión del tráfico–, se hace aún más evidente la necesidad de acelerar la implantación de las instalaciones de tratamiento previstas. En futuros trabajos se pretende incorporar otros impactos ambientales del transporte menos estudiados, como pueden ser el ruido o el uso del suelo, para complementar los resultados alcanzados en el presente estudio.

## Referencias

- Burón, J.M., López, J.M., Aparicio, F., Martín, M.A., & García, A. (2004). Estimation of road transport emissions in Spain from 1988 to 1999 using COPERT III program. *Atmospheric Environment*, 38, 715-724.
- CMAAUV (Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda). (2001). *Plan Zonal de residuos de la Zona I*.
- CMAAUV (Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda). (2002). *Plan Zonal de residuos de la Zonas III y VIII*.
- CMAAUV (Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda). (2004). *Plan Zonal de residuos de la Zonas II, IV y V*.
- CMAAUV (Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda). (2010). *Plan Integral de Residuos de la Comunitat Valenciana 2010*.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell & C.A. Johnson (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara & K. Tanabe (Eds.). Japón: IGES.
- Léonardi, J., & Baumgartner, M. (2004). CO<sub>2</sub> efficiency in road freight transportation: Status quo, measures and potential. *Transportation Research Part D*, 9, 451-464.
- MARM (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino). (2008). *Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015*.



NCGIA (National Center for Geographic Information and Analysis). (1990). *I Introduction to GIS, II Technical issues in GIS, III Applications issues in GIS*. Santa Bárbara: University of California.

Strange, K. (2002). Overview of Waste Management Options: Their Efficacy and Acceptability. En R. E. Hester & R. M. Harrison (Eds.), *Environmental and Health Impact of of Solid Waste Management Activities* (pp. 1-51). Cambridge: Royal Society of Chemistry.

Tello, E. (2002). Ecología urbana y democracia participativa. Las experiencias de la plataforma ciudadana 'Barcelona Estalvia Energia' y del 'Fòrum Cívic Barcelona Sostenible'. En O. Vázquez, J. A. Domínguez & A. Gaona (Eds.), *Trabajo social y medio ambiente: empleo, formación y participación* (pp. 119-132). España: Universidad de Huelva.

Vidal, R., Rubio, V., Moliner, E., Muñoz, C., Gasch, C., Soler, S., & Ayora, C. (2009). *Mapa de Residuos de la Provincia de Castellón (Informe interno del Grupo de Ingeniería del Diseño GID.2009.06 para la Cámara de Comercio, Industria y Navegación de Castellón)*. Castellón: Universidad Jaume I.

Wackernagel, M., & Rees, W. (1995). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Columbia Británica & Filadelfia: New Society Publishers.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Enrique Moliner  
GID – Grupo de Ingeniería del Diseño  
Dpto. de Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I  
Phone: +34 964729252  
Fax: + 34 964728106  
E-mail : santiste@uji.es  
URL : <http://www.gid.uji.es>