

METHODOLOGY FOR HOUSEHOLD CARBON FOOTPRINT CALCULATION INCORPORATED IN URBAN PLANNING PROCEDURES

Zubelzu Mínguez, Sergio¹; Hernández Colomina, Ana²

¹ Universidad Complutense de Madrid, ² ANSER Ingenieros SL

Present paper exposes a methodology to incorporate carbon footprint calculation in urban planning process. Methodology is aligned with available information in the urban planning phase and allows defining preventive measurements based on, for example, land classification, land uses, edificability indexes or system infrastructures and dotational facilities. Using developed methodology for residential land use, general scope is defined, sources are identified and greenhouse gas emissions are calculated amounting to 6.609 tCO₂eq/year. A set of 31 municipalities in Madrid have been analyzed quantifying its greenhouse gas emissions which vary between 165.23 and 147,543.32 tCO₂eq/year. Relations between carbon footprint and urban design variables are also studied as well as non developable surface (ha) required for every developable one (ha) resulting from 3.18 to 24.55 ratios to ensure complete carbon capture.

Keywords: *Greenhouse gas; Carbon footprint; Diffuse emissions; Urban planning*

APLICACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO DEL USO RESIDENCIAL INTEGRADA EN LOS INSTRUMENTOS DE PLANEAMIENTO URBANÍSTICO

En la presente comunicación se expone una técnica para la incorporación del cálculo de la huella de carbono en los procedimientos urbanísticos. El método es acorde con el nivel de información disponible en la fase de planeamiento urbanístico y permite adoptar medidas preventivas basadas en el proceso de diseño urbano tales como la clasificación de suelos, la concreción de usos y aprovechamientos o las medidas vinculadas a los sistemas generales y dotaciones. Se ha definido el contexto general, identificado las fuentes y cuantificado las emisiones vinculadas a los usos residenciales, que se han cifrado en 6,609 tCO₂eq/viv•año. Como aplicación práctica del modelo se ha realizado un análisis de 31 municipios de la Comunidad de Madrid oscilando sus emisiones entre las 165,23 y las 147.543,32 tCO₂eq/año. Se han estudiado también las relaciones entre las emisiones y los parámetros de diseño urbanístico y la aptitud de suelo no urbanizable para fijar las emisiones previstas oscilando los ratios entre las 3,18 y las 24,55 hectáreas de suelo no urbanizable por cada hectárea de suelo destinado al crecimiento urbanístico.

Palabras clave: *Gases de efecto invernadero; Huella de carbono; Emisiones difusas; Planeamiento urbanístico*

Correspondencia: szubelzu@ucm.es

1. Introducción

Los municipios poseen una relevancia considerable de cara a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs) de carácter difuso. Entre estas emisiones difusas se incluyen las procedentes del transporte, los usos residenciales, los residuos, la actividad comercial o la industrial no incluida en los planes nacionales de asignación, por ejemplo.

Dentro del ámbito de gestión municipal existen, básicamente, dos tipos de medidas que pueden adoptarse en relación a las emisiones de GEIs. En un primer grupo de medidas cabría incluir las destinadas a reducir las emisiones generadas por la ciudad en funcionamiento en el momento de adopción y que poseerían un efecto correctivo. El segundo tipo incluiría las medidas preventivas que encontrarían en el planeamiento urbanístico su principal vehículo de concreción.

El primer grupo de medidas anteriores han sido promovidas con cierta frecuencia tal y como queda reflejado en Sovacool y Brown (2010), en Puliafito y Allende (2007) o en Dhakal. (2009). Por el contrario, son escasos los estudios preventivos relacionados con las emisiones que en un futuro se generarían a raíz de los proyectos urbanísticos.

El planeamiento urbanístico tiene una influencia determinante sobre las emisiones de GEIs en general (Engel et al, 2012) y sobre las difusas en particular al ordenar los transportes, la tipología de usos que se implantan o la gestión de los residuos.

La principal ventaja de la vinculación del cálculo de las emisiones de GEIs con el planeamiento urbanístico tiene que ver con la facilidad para implementar medidas preventivas para su reducción y compensación basadas en decisiones de diseño urbano. Ejemplos de medidas de este tipo pueden encontrarse, por ejemplo, en Dong et al (2013) referido a desarrollos industriales, en Kim y Kim (2013) respecto de la intensidad residencial, en Ho et al (2013) para el diseño urbano, en Wu et al (2013) para ciudades ecoeficientes o incluso en La Roche (2010) referido a soluciones edificatorias.

De esta forma, el objetivo principal de la presente comunicación es proponer una metodología para el cálculo de la huella de carbono vinculada a los usos urbanos residenciales y que pueda ser implementada a través de los instrumentos de planeamiento urbanístico.

2. Metodología

De entre todos los instrumentos propios del planeamiento general, se ha optado por el plan general de ordenación urbana por tratarse de la norma urbanística básica que incide sobre la totalidad del término municipal.

Fijado el instrumento de planeamiento, la metodología seguida para alcanzar los objetivos exigió definir el marco teórico general (caracterizar las fuentes de emisión, cuantificar consumos y factores de emisión) y calcular las emisiones. Como complemento práctico de la propuesta teórica de cálculo se ha realizado un estudio de la huella de carbono del planeamiento vigente en una serie de 31 términos municipales ubicados en la franja sur de la Comunidad de Madrid.

2.1. Marco teórico general

El marco teórico general de cálculo implica definir el responsable de las emisiones en torno al que orientar el proceso de cálculo. Así, obviando las particularidades normativas y haciendo las simplificaciones oportunas, un plan general de ordenación urbana debe definir el modelo de ocupación del suelo, el resto de determinaciones estructurantes y las condiciones de gestión.

El modelo de ocupación del suelo implica adscribir todo el terreno del término municipal a alguna de las clases de suelo (urbano, urbanizable o no urbanizable) y tiene un efecto evidente sobre la huella de carbono al identificar los terrenos en los que el municipio crecerá generando emisiones y, de forma complementaria, los terrenos que quedan excluidos de la urbanización y, por consiguiente, son potencialmente aptos para fijar las emisiones.

Este modelo de ocupación guarda relación con las condiciones de gestión puesto que entre ellas se incluyen las exigencias bajo las que los terrenos aptos para el crecimiento son desarrollados e identifican a los responsables de llevar a cabo este desarrollo (ámbitos o sectores urbanísticos). Éstos son los responsables de cada desarrollo urbanístico y encajan a la perfección con la figura del agente responsable del cálculo de la huella de carbono en los términos definidos por el British Standards Institution (2008).

Respecto del resto de determinaciones estructurantes, a nivel de plan general deben definirse los usos y aprovechamientos globales y, en segundo lugar, las redes públicas. Los primeros tienen un efecto evidente sobre la huella de carbono y avalan la identificación de los sectores o ámbitos como agentes responsables, ya que definen el tipo de uso que se implanta en cada ámbito o sector (residencial, industrial, terciario) y con qué intensidad (aprovechamiento).

Entre las redes públicas se incluyen los sistemas de comunicación, los equipamientos, las infraestructuras y la red de espacios libres y zonas verdes.

La red de espacios libres puede asumirse a nivel planeamiento general que posee un balance neutral mientras que los equipamientos, que pueden concretarse de formas diversas, pueden ser considerados a los efectos del cálculo de la huella de carbono como un uso del suelo más.

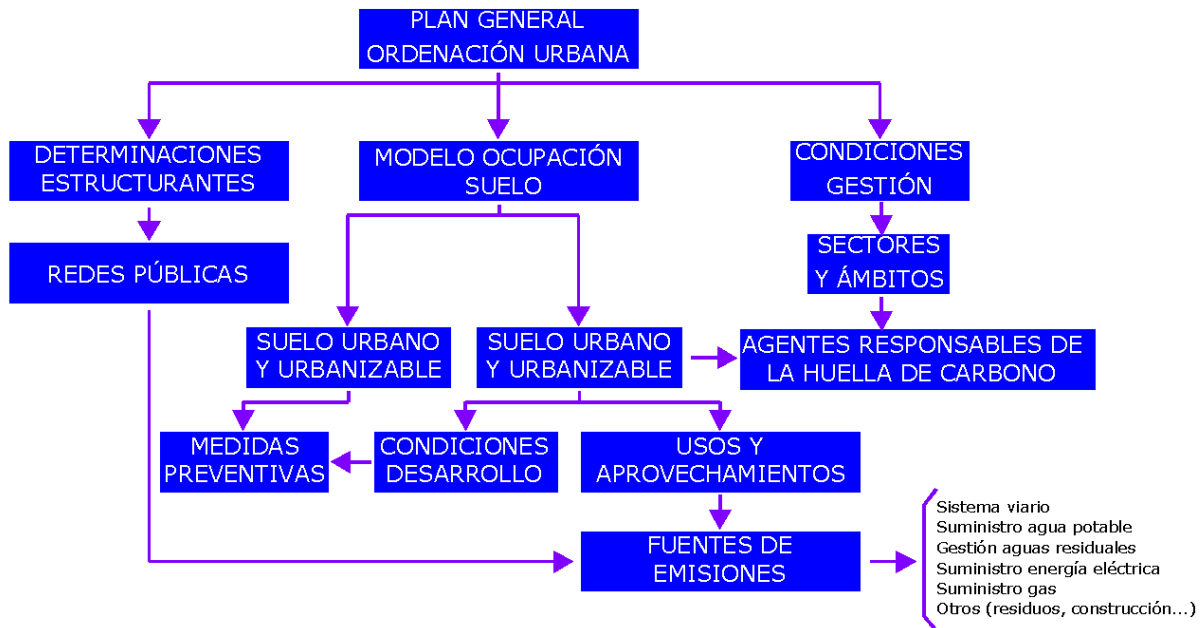
En cuanto a las otras dos redes citadas, comunicaciones e infraestructuras, su efecto es claro sobre la huella de carbono. Sin embargo, las emisiones imputables a este tipo de redes no son, al menos en su mayor parte, consecuencia directa de ellas mismas, sino de su consumo por parte de los usos referidos (un viario o una red de suministro de gas no emite GEIs por sí misma, sino que lo hacen los usuarios circulando por ella o consumiendo gas) lo que, de cara a evitar la doble contabilidad de las emisiones, exige imputar sus emisiones al consumidor final (ámbito o sector urbanístico) como responsable de las mismas.

2.2. Fuentes de emisión

La identificación de las fuentes de emisión debe centrarse en el agente responsable del cálculo de la huella de carbono. Así, cada ámbito o sector queda definido en el plan general por un uso y aprovechamiento global y unas condiciones para su desarrollo. Los dos primeros no generan emisiones directamente aunque sí afectan al tipo de fuentes (usos) y a la intensidad de las emisiones (aprovechamientos). Tampoco generan emisiones las condiciones de desarrollo, que por el contrario sí permiten instrumentar medidas preventivas.

Para encontrar las fuentes queda por tanto estudiar las redes públicas que dan servicio a los sectores o ámbitos que se incluyen en el planeamiento general y de cuyo uso o disposición se generan emisiones (red viaria, el abastecimiento de agua, energía eléctrica, saneamiento y suministro de gas). El esquema incluido en la figura 1 resume todo el proceso deductivo anterior encaminado a encuadrar el modelo de cálculo.

Figura 1. Encuadre metodológico análisis de la huella de carbono planeamiento general



2.3. Consumos y factores de emisión

El cálculo de la huella de carbono se realiza de forma directa sin más que aplicar los correspondientes factores de emisión a los consumos de recursos vinculados a las fuentes.

$$HC(\text{kgCO}_2\text{eq}) = \sum_{i=1}^{i=n} C_i(\text{uds}) \times FE_i(\text{kgCO}_2\text{eq/udC}) \quad (1)$$

Los consumos (C_i) se han recopilado a partir de fuentes de información secundarias, lo que ha exigido el empleo de datos de diferente procedencia para su contraste. Los factores de emisión (FE_i) se han referido a CO_2 equivalente (CO_2eq) que incluye la equivalencia en términos de CO_2 de todos los GEIs.

Se ha utilizado, por tratarse del más actualizado, la estimación del factor de emisión publicada por la Oficina Catalana de Cambio Climático (OCCC, 2014) según la cual, el factor de emisión del mix de generación eléctrica peninsular en el año 2013 fue de 0,248 $\text{kgCO}_2\text{eq/kWh}$. Para el consumo directo de gas natural en las viviendas se empleará un factor de 0,2 $\text{kg CO}_2\text{eq/kWh}$ (MARM, 2011), mientras que para el transporte con vehículo privado se asumirá un factor de 0,20487 $\text{kgCO}_2\text{eq/km}$ (Zubelzu et al, 2011). En los casos en los que se ha requerido homogeneizar unidades se asumió una tasa de ocupación de las viviendas de 2,9 hab/vivienda, cifra calculada para la Comunidad de Madrid en el Censo de Población y Vivienda publicado por el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2013).

3. Resultados y discusión

En los siguientes apartados se exponen los resultados relativos a la propuesta teórica para el cálculo de la huella de carbono vinculada al uso residencial y, en segundo lugar, el análisis realizado para los municipios de la Comunidad de Madrid.

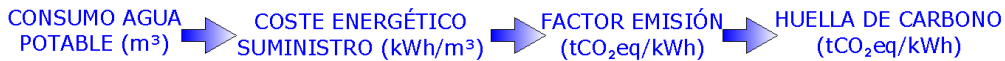
3.1. Propuesta teórica de cálculo

En cada uno de los puntos siguientes se expondrá el resultado de los cálculos de la huella de carbono de cada fuente incluyendo finalmente un resumen a partir del cual deducir la expresión general de cálculo.

1. Suministro agua potable

El proceso para el cálculo de la huella de carbono imputable al consumo de agua potable exige queda esquematizado en la figura 2.

Figura 2. Esquema metodológico cálculo huella de carbono agua potable



Según el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2014) el consumo medio de agua potable en la Comunidad Autónoma de Madrid ascendió a 145 litros por habitante. El coste energético del suministro de agua potable ha sido estudiado por varios autores. En la tabla 2 se resumen los datos de coste energético de la parte de suministro de agua del ciclo completo para algunos de los trabajos más relevantes.

Tabla 2. Coste energético del suministro de agua potable según estudios

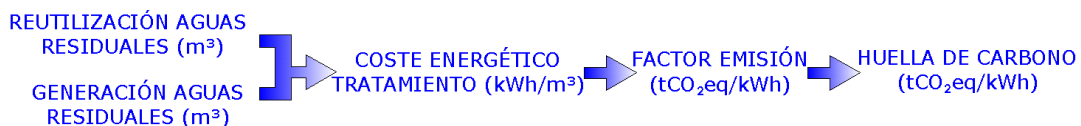
Autor/es	Intensidad energética (kWh/m ³)		
	Límite inferior	Valor medio	Límite superior
California Energy Comisión (2005)	0,21	-	8,25
Captación superficial	0,0002	-	1,74
Salas (2007) Captación subterránea	0,37	-	1,32
Desalación	4,94	-	5,41
Cabrera et al (2010)	0,13	-	0,31
Hardy y Garrido (2010)	0,23	1,02	6,99
Qi y Ni-Bing (2013)	-	1,29	-

De entre los datos incluidos en la tabla 2 se ha optado por utilizar el valor medio propuesto por Hardy y Garrido (2010) por ser el más adaptado a las condiciones locales. De esta forma, el coste energético anual para cada habitante de la Comunidad de Madrid asciende a 53,98 kWh y la huella de carbono resulta ser de 13,78 kgCO₂eq/año.

2. Saneamiento aguas residuales

El proceso para la determinación de la huella de carbono derivada del tratamiento de las aguas residuales se observa en el esquema incluido en la figura 3.

Figura 3. Esquema metodológico para el cálculo de la huella de carbono derivada del tratamiento de las aguas residuales domésticas



Según el Instituto Nacional de Estadística (2014), la cantidad de agua residual tratada por cada habitante y día ascendió a 0,22 m³ (valor que coincide aproximadamente con lo publicado por el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid –IECM, 2014–que cifra

este dato en $0,2 \text{ m}^3$), siendo la cantidad de agua reutilizada de $0,0022 \text{ m}^3$ por cada habitante y día. El coste energético calculado por diferentes autores para el tratamiento y reutilización de las aguas residuales se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Coste energético del tratamiento de aguas residuales según estudios

Autor/es	Coste energético depuración (kWh/m ³)			Coste energético reutilización (kWh/m ³)		
	Límite inferior	Valor medio	Límite superior	Límite inferior	Valor medio	Límite superior
California Energy Comisión (2005)	0,29		1,33	0,11		0,32
Cabrera et al (2010)	0,36		0,80	0,2		0,43
Hardy y Garrido (2010)	0,41	0,58	0,72	0,32	0,57	0,85
Qi y Ni-Bing (2013)		0,976				

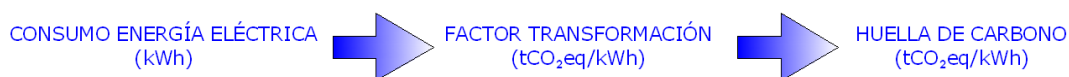
Existen trabajos muy detallados que permiten analizar la huella de carbono propia de diferentes tratamientos para la depuración de las aguas residuales (Rodríguez-García et al 2012) que presentan resultados en el entorno de los deducidos a partir de la información contenida en la tabla 3. De entre todos los datos anteriores se opta de nuevo por emplear los valores medios propuestos en el trabajo de Hardy y Garrido (2010) por ser los más adaptados a las condiciones locales.

Resulta por tanto una huella de carbono de $11,55 \text{ kgCO}_2\text{eq/año}$ consecuencia del tratamiento de las aguas residuales y de $0,11 \text{ kgCO}_2\text{eq/año}$ debidas a la reutilización, ascendiendo el total a $11,66 \text{ kgCO}_2\text{eq/año}$.

3. Energía eléctrica

El cálculo de la huella de carbono consecuencia del consumo de energía eléctrica requiere simplemente aplicar el factor de emisión correspondiente al consumo medido (figura 4).

Figura 4. Esquema metodológico para el cálculo de la huella de carbono derivada del consumo de energía eléctrica

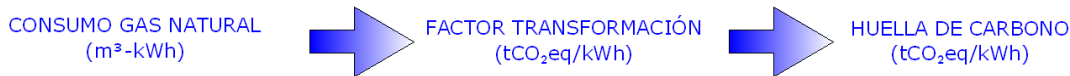


En el presente trabajo, a la vista de la información publicada por la Comisión Nacional de la Energía (2011) y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, 2011), se supone que la red de energía eléctrica da servicio a electrodomésticos, iluminación y aire acondicionado mientras que la cocina, calefacción y agua caliente se abastecen de gas natural. Una vivienda tipo así definida consume $2.746,47 \text{ kWh/año}$ en la España peninsular (IDAE, 2011) lo que genera una huella de carbono de $234,87 \text{ kgCO}_2\text{eq/año}$.

4. Suministro de gas

El esquema para la determinación de la huella de carbono derivada del consumo de gas natural queda reflejado en la figura 5.

Figura 5. Esquema metodológico para el cálculo de la huella de carbono procedente del consumo de gas natural



De acuerdo con la Comisión Nacional de la Energía (2011), el consumo medio del sector doméstico en el año 2010 en la Comunidad de Madrid osciló entre 10,26 y 13,5 MWh por cada vivienda. Según la Federación de la Energía de la Comunidad de Madrid (FENERCOM, 2011), el consumo doméstico de gas natural en la Comunidad de Madrid fue de 1.347 ktep (15.103.827 kWh) en 2010 lo cual se traduce, suponiendo 1.691.467 clientes, en un consumo medio de 8,9 MWh por cada cliente doméstico.

Aceptando como válido el dato intermedio de 10,26 MWh, la huella de carbono resultante sería de 707,58 kg CO₂eq/año para cada habitante.

5. Infraestructuras de comunicación (tráfico rodado)

Para el cálculo de la huella de carbono debida al transporte se utiliza la información referida a las características de los movimientos y se estima la huella aplicando los factores de emisión correspondientes. Así, según Monzón de Cáceres y De la Hoz (2009), la longitud media de los trayectos obligados ascendía en el año 2004 a 10,3 km mientras que la longitud de los trayectos no obligados ascendió a 5,7 km, ambos datos referidos a la Comunidad de Madrid.

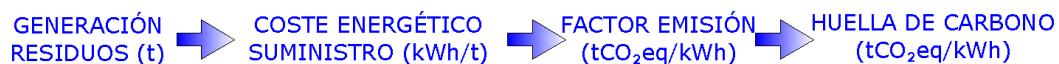
Utilizando tales distancias, suponiendo que los movimientos obligados se producen a lo largo de los días laborables (250 días/año) y los no obligados el resto de días, resultan unas emisiones totales anuales debidas al tráfico rodado de 661,18 kgCO₂eq/año.

6. Otras emisiones

Tratamiento residuos

El esquema para la determinación de la huella de carbono consecuencia del tratamiento de residuos se observa en la figura 6.

Figura 6. Esquema metodológico para el cálculo de la huella de carbono derivada del tratamiento de los residuos sólidos



Las complicaciones en este punto aparecen en la determinación del coste energético y del factor de transformación consecuencia de la complejidad del tratamiento de los residuos, de la diversidad de residuos generados y de la escasez de fuentes fiables respecto del coste energético de la gestión de los residuos.

Para simplificar el cálculo se recurre a los datos agregados, tanto de generación total de residuos como de emisiones de GEIs, incluidos en el Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2011). Según esta publicación, en el año 2008 se generaron 15.560.000 tCO₂eq consecuencia del tratamiento de un total de 27.462.704 t de residuos, datos de los que resulta una tasa de emisión de 0,56 tCO₂eq/t de residuo tratado. Esta cifra es ligeramente superior a las 0,341 tCO₂eq/t de residuo obtenida para el área metropolitana de Barcelona (Romero, 2010) y a los resultados obtenidos por Mühle et al (2010) que cifraron en 0,2844 y 0,103 tCO₂eq/t de residuo tratado para Reino Unido y Alemania, respectivamente. De entre los dos datos manejados, se empleará el valor intermedio de los dos datos referidos a España, que resulta ser 0,45 tCO₂eq/t de residuo.

De esta forma, suponiendo que cada habitante genera en la Comunidad de Madrid 0,44 t de residuo al año (INE, 2013), la huella de carbono debida al tratamiento de residuos asciende a 198 kg CO₂eq/año para cada habitante.

Obras de urbanización y edificación

Han sido varios los autores que han estudiado la huella de carbono de las obras de construcción (Suzuki y Oka, 2011; La Roche, 2010; Onat et al, 2014, Strobele, 2013). La naturaleza puntual de estas emisiones exige repercutirlas durante la vida útil del bien (50 años). Esta es la aproximación que realiza La Roche (2010) deduciendo unas emisiones anuales a considerar de 1,061 tCO₂eq/vivienda, lo que representan 0,365 tCO₂eq/habitante. Por su parte, Espelt y Adarve (2009) calcularon, para un modelo urbanístico tipo en la ciudad de Barcelona, una cifra de 871 kg/hab para la obra de urbanización y 15.221 kg/hab para la edificación. Sumando estas cifras y repercutiéndolas durante la vida útil resulta una cifra de 0,321 tCO₂eq/habitante al año.

Las dos cifras resultan similares aun procediendo de fuentes y métodos de cálculo diferentes, hecho que permite adoptar como válido el promedio de ambos que resulta ser de 343,32 kgCO₂eq/habitante al año.

Otras emisiones

Además de las anteriores emisiones directamente imputables a los ámbitos urbanísticos, cabe considerar otra serie de actividades que permiten el uso urbano pero cuya responsabilidad no recae directamente sobre los habitantes. Se trataría de las emisiones derivadas de servicios urbanos (alumbrado, limpieza viaria, mantenimiento de la urbanización, por ejemplo). Estas emisiones entrarían dentro del denominado alcance 3, para cuyo cómputo se acepta válida la asignación de un porcentaje debido a las incertidumbres existentes para su cálculo a nivel planeamiento general. La magnitud de estas emisiones se ha cifrado en el 5% de la suma de las referidas en los puntos anteriores. Algunos autores (Lin et al, 2013; Ramaswami et al, 2008) calculan estas emisiones en torno al 10%, pero incluyendo todas las emisiones derivadas de la actividad del habitante y no únicamente las imputables a la actividad urbanística.

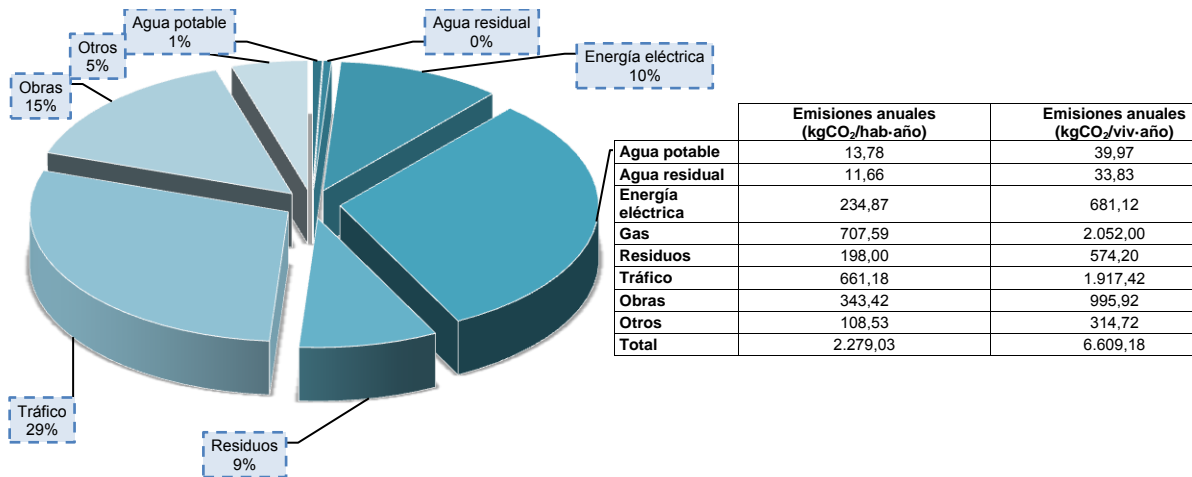
7. Resumen de emisiones

Partiendo de los argumentos expuestos en los puntos anteriores se ha deducido una expresión que permite calcular la huella de carbono función de los parámetros de diseño que se manejan en el planeamiento urbanístico general como son el número de viviendas y la ocupación prevista (fórmula 2).

$$\begin{aligned}
 HC\left(\frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{año}}\right) &= 1,05 \times [HC_{\text{agua}} + HC_{\text{ag.resid}} + HC_{\text{elec}} + HC_{\text{gas}} + HC_{\text{obras}} + HC_{\text{traf}} + HC_{\text{resid}}] = \\
 &= 1,05 \times 2.170,5 \left(\frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{hab}}\right) \times Oc\left(\frac{\text{hab}}{\text{vivienda}}\right) \times N^{\circ}\text{viviendas}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Las cifras finales resumen por habitante y vivienda resultado de la aplicación de la fórmula 2 incluyen en la figura 7.

Figura 7. Resumen de los componentes de la huella de carbono total de la actividad urbanística



A la vista de la información contenida en la figura 7, la fuente más relevante sería el gas, seguido del transporte siendo los conceptos con menor influencia los referidos a las aguas.

La cifra global de huella de carbono por cada habitante expuesta en la figura 7 resulta comparable a la obtenida por otros autores. Por ejemplo, los resultados expuestos en Lin et al (2013) y Ramaswami et al (2008), para un conjunto de 12 grandes ciudades, muestran resultados, para las fuentes consideradas en la presente comunicación (un 20,97% del total según sus cálculos), que oscilan entre 4,3 y 0,996 tCO₂eq/año para Denver y Tokio, respectivamente.

Minx et al (2013) estudiaron la huella de carbono, también derivada de todas las fuentes y no únicamente de las urbanísticas, para un total de 434 municipios del Reino Unido, alcanzando una huella promedio para todos ellos de 12,5 tCO₂eq para cada habitante. En este estudio no se especifica la composición de la cifra total obtenida pero si se aceptase como válida la cifra del 20,97% anterior implicaría una emisión de 2,61 tCO₂eq/año, cifra también muy próxima a la deducida en el presente trabajo. Petsch et al (2011) cifraron la huella de carbono de determinados tipos de familias en Arizona en el entorno de las 19,5 tCO₂eq/año lo que resultaría ligeramente superior a la cifra calculada en este estudio. De forma similar, en el estudio de Jones y Kammen (2013) esta cifra, calculada a partir de más de 2.000 familias en Estados Unidos, ascendía a 20 tCO₂eq/año.

Los estudios referidos en los párrafos precedentes utilizan modelos de consumo basados en el cálculo la huella de carbono familiar a partir de las cestas de consumo de cada zona y, en cierta medida, la similitud entre los datos calculados en el presente trabajo y los obtenidos en base a estudios de este tipo otorgan evidencia empírica a los cálculos teóricos aquí realizados.

3.2. Ejemplo de cálculo Comunidad de Madrid

Se ha estudiado la huella de carbono para un conjunto de 31 municipios ubicados en la franja sur de la Comunidad de Madrid cuya localización queda reflejada en la figura 7.

Figura 7. Localización términos municipales seleccionados para el estudio



Los resultados del cálculo de la huella de carbono quedan expuestos en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros urbanísticos en los municipios analizados

Municipio	Nº viviendas	Sup. crecimientos (ha)	HC Total (tCO ₂ eq/año)
Estremera	2.098	116	13.866,06
Fuentidueña de Tajo	1.291	184	8.532,45
Valdaracete	150	13	991,38
Villarejo de Salvanés	3.037	113	20.072,08
Villamanrique del Tajo	112	4	740,23
Belmonte del Tajo	405	20	2.676,72
Valdelaguna	444	29	2.934,48
Chinchón	175	6	1.156,61
Titulcia	732	34	4.837,92
Ciempozuelos	6.529	366	43.151,33
Aranjuez	15.917	1.656	105.198,31
Valdemoro	22.324	615	147.543,32
Torrejón de Velasco	3.913	154	25.861,72
Pinto	3.789	82	25.042,18
Parla	9.316	393	61.571,12
Humanes de Madrid	872	22	5.763,20
Torrejón de la Calzada	2.384	83	15.756,28
Griñón	839	78	5.545,10
Cubas de la Sagra	3.268	216	21.598,80
Casarrubuelos	1.352	52	8.935,61
Moraleja de Enmedio	1.077	70	7.118,09
Serranillos del Valle	1.747	109	11.546,24

Municipio	Nº viviendas	Sup. crecimientos (ha)	HC Total (tCO ₂ eq/año)
Batres	423	28	2.795,68
Arroyomolinos	8.818	367	58.279,74
El Álamo	2.724	352	18.003,40
Navalcarnero	20.325	528	134.331,57
Villamanta	811	64	5.360,04
Aldea del Fresno	664	49	4.388,50
Villa del Prado	1.086	81	7.177,57
Cadalso de los Vidrios	25	1	165,23
Cenicientos	362	22	2.392,52

Nota: la información en la tabla 4 se ha extraído del sistema de información cartográfica de la Comunidad de Madrid (<http://www.madrid.org/cartografia/planea/planeamiento/html/visor.htm>). Podría no corresponder exactamente con el planeamiento vigente por no haberse considerado todas las modificaciones puntuales. Las cifras de viviendas definitivas o de superficies destinadas a crecimientos y edificadas podrían no coincidir exactamente con las cifras resultantes tras el planeamiento de desarrollo puesto que en ocasiones se han estimado a partir de parámetros de diseño urbanístico tales como edificabilidades o aprovechamientos.

Los resultados incluidos en la tabla 4 muestran cómo las mayores emisiones aparecen en los términos municipales de Valdemoro, Navalcarnero y Aranjuez, superando en los tres casos las 100.000 tCO₂eq/año resultando las emisiones menos elevadas por debajo de las 1.000 tCO₂eq/año (Valdaracete, Villamanrique de Tajo y Cadalso de los Vidrios).

4. Conclusiones

En la presente comunicación se presenta una metodología que permite calcular la huella de carbono de los usos residenciales incorporada en los procedimientos urbanísticos. El modelo de cálculo se ha desarrollado a partir de la investigación acerca de las fuentes de emisión imputables al nivel de instrumento de planeamiento general.

Se han cuantificado los consumos y aplicado los factores de emisión correspondientes hasta deducir una huella de carbono de 6,60918 tCO₂eq/año por cada vivienda proyectada en un plan general de ordenación urbana. Las fuentes que en mayor medida contribuyen a la cifra anterior son el transporte y el consumo de gas natural, suponiendo ambas el 60% del total de las emisiones. Como complemento a lo anterior se ha deducido una expresión que permite calcular la huella incorporando el número de viviendas y la ocupación previstas como únicas variables independientes.

La aplicación práctica de estudio relacionada con los municipios del sur de la Comunidad de Madrid muestra cómo las emisiones de los municipios con mayores crecimientos superan las 100.000 tCO₂eq/año a techo de planeamiento.

5. Referencias

- British Standards Institution. (2008) *Guide to PAS 2050: How to assess the carbon footprint of goods and services*. Londres: Department for Environment Food and Rural Affairs.
- Cabrera, E., Pardo, M. A., Cabrera, E., & Cobacho, R. (2010). Agua y Energía en España. Un reto complejo y fascinante. *Ingeniería del Agua*, 17(3), 235-246
- California Energy Comisión (2005). *California's water-energy relationship. Final staff report. CEC 700-2005-011 SF*. California: California Energy Comisión.
- Comisión Nacional de la Energía (2011). *Informe de supervisión del mercado minorista del gas natural en España 2010*. Madrid: Comisión Nacional de la Energía.

- Dhakal, S. (2009). Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. *Energy policy*, 37, 4208-4219.
- Dong, H. J., Geng, Y., Xi, F. M., & Fujita, T. (2013). Carbon footprint evaluation at industrial park level: A hybrid life cycle assessment approach. *Energy Policy*, 57, 298-307.
- Espelt, P., & Adarve, P. (2009). Consumo energético y emisiones de la Construcción de 6 modelos urbanísticos. Sesión presentada en el II Congreso Internacional de Medida y Modelización de la Sostenibilidad, Barcelona.
- Farreny, R., Oliver-Sola, J., Montlleo, M., Escribá, E., Gabarrell, X., & Rieradevall, J. (2011). The ecodesign and planning of sustainable neighbourhoods: the Vallbona case study (Barcelona). *Informes de la Construcción*, 63, 115-124.
- FENERCOM (2011). *Balance energético de la Comunidad de Madrid 2010*. Madrid: Federación de la Energía de la Comunidad de Madrid, Consejería de Economía y Hacienda.
- Hardy L. & Garrido A. (2010). *Análisis y evaluación de las relaciones entre el agua y la energía en España*. Papeles de agua virtual nº 6. Madrid: Fundación Botín.
- Ho, C. S., Matsuoka, Y., Simson, J., & Gomi, K. (2013). Low carbon urban development strategy in Malaysia - The case of Iskandar Malaysia development corridor. *Habitat International*, 37, 43-51.
- IDAE, (2011) Proyecto Sech-Spahousec. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe final. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético.
- INE (2013). *Censo de Población y Vivienda 2011*. Instituto Nacional de Estadística. Obtenido de http://www.ine.es/inebmenu/mnu_cifraspob.htm.
- INE (2014). *Encuesta sobre suministro y saneamiento de agua 2009*. Instituto Nacional de Estadística.
- IECM (2014). *Estadísticas Sociales: Entorno físico y Medio Ambiente*. Obtenido de http://www.madrid.org/iestadis/fijas/otros/estructu_mfa.htm.
- Jones, C. H., & Kammen, D. M. (2013). Quantifying Carbon Footprint Reduction Opportunities for U.S. Households and Communities. *Journal of Environmental Science and Technology*, 48, 895-902.
- Kim, T. & Kim H. (2013). Analysis of the effects of intra-urban spatial structures on carbon footprint of residents in Seoul, Korea. *Habitat International*, 38, 192-198.
- La Roche, P. (2010). Calculating green house gas emissions for buildings: analysis of the performance of several carbon counting tools in different climates. *Informes de la Construcción*, 62, 61-80.
- Lin, J. Y., Liu, Y., Meng, F. X., Cui, S. H., & Xu, L. L. (2013). Using hybrid method to evaluate carbon footprint of Xiamen City, China. *Energy Policy*, 58, 220-227.
- MARM (2011). Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de España e información adicional años 1990-2009. Madrid: Dirección General Ofician Española de Cambio Climático. Ministerio de Medio ambiente, Medio Rural y Marino.
- Minx, J., Baiocchi, G., Wiedmann, T., Barrett, J., Creutzig, F., Feng, K., Förster, K., Pichler, P., Weisz, H., & Hubacek, K. (2013). Carbon footprints of cities and other human settlements in the UK. *Environmental Research Letter*. 8(035039).
- Monzón de Cáceres, A. & De la Hoz, D. (2009). Efectos sobre la movilidad de la dinámica territorial de Madrid. *Urban*, 14, 58-71.
- Mühle, S., Balsamb, I., & Cheeseman, C. R. (2010). Comparison of carbon emissions associated with municipal solid waste management in Germany and the UK *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 793-801.
- OCCC (2014). Nota informativa sobre la metodología de estimación del mix eléctrico por parte de la Oficina Catalana del Cambio Climático. Oficina Catalana del Cambio Climático Obtenido el 17 de marzo de 2014 de http://www20.gencat.cat/docs/canviclimatic/Home/Redueix%20emissions/Factors%20emissio%20associats%20energia/140227_Nota%20metodològica%20mix_cast.pdf.

- Onat, N. C., Kucukvar, M., & Tatari, O. (2014). Scope-based carbon footprint analysis of U.S. residential and commercial buildings: An input–output hybrid life cycle assessment approach. *Building and Environment*, 72, 53-62.
- Petsch, S., Guhathakurta, S., Heischbourg, L., Müller, K., & Hagen, H. (2011). Modeling, Monitoring, and Visualizing Carbon Footprints at the Urban Neighborhood Scale. *Journal of Urban Technology*, 18(4), 81-96.
- Puliafito, S. E., & Allende, D. (2007). Patrones de Emisión de la Contaminación Urbana. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquía*, 42, 38-56.
- Qi C., & Ni-Bing C. (2013). Integrated carbón footprint and cost evaluation of a drinking wáter infrastructure system for screening expansión alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 60, 170-181.
- Ramaswami, A., Hillman, T., Janson, B., Reiner, M., & Thomas, G. (2008). A demandcentered, hybrid life cycle methodology for city-scale greenhouse gas emissions, in press. *Environmental Science and Technology*, 42, 6455-6461.
- Rodríguez-García, C., Hospido, A., Bagley, D. M., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2012). A methodology to estimate greenhouse gases emissions in Life Cycle Inventories of wastewater treatment plants. *Environmental Impact Assessment Review*, 37, 37-46.
- Romero, A (2010). Las emisiones de GEI en el tratamiento de Residuos Municipales en el Área Metropolitana de Barcelona. Sesión presentada en las IX Jornadas sobre Biometanización de Residuos Sólidos Urbanos, Barcelona.
- Sala L. (2007). Balances energéticos del ciclo de agua y experiencias de reutilización planificada en municipios de la Costa Brava. Comunicación presentada en Seminario Agua, Energía y Cambio Climático, Valencia.
- Sovacool, B. K., & Brown, M. A. (2010). Twelve metropolitan carbon footprints: A preliminary comparative global assessment. *Energy Policy*, 38, 4856-4869.
- Strobele, B. (2013). Limits of the carbon footprint for the assessment of ecological construction. *Bauphysik*, 35(5), 338-345
- Suzuki, M., & Oka, T. (2011) Estimation of life cycle energy consumption and CO₂ emission of office buildings in Japan. *Energy and Buildings*, 28(1), 33-41.
- Weber C. L., & Matthews, H. S. (2008). Quantifying the Global and Distributional Aspects of American Household Carbon Footprint. *Ecological Economics*, 66(2-3), 379-391.
- Zubelzu, S., Isidro, A., Blanco, F., & Gutiérrez, M. A. (2011). Los Métodos Gravitacionales como herramienta para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del tráfico rodado en la planificación urbana. *Revista de construcción*, 26(2): 187-207