

# **Intermodalidad AVE-avión: implicaciones medio-ambientales y efectos de red. Aplicación al aeropuerto de Madrid-Barajas**

**Massimiliano Zanin**

Investigador, Fundación Instituto de Investigación Innaxis, España

**Sophie Ladousse**

Investigadora, Fundación Instituto de Investigación Innaxis, España

**Ricardo Herranz**

Program Manager, Fundación Instituto de Investigación Innaxis, España

## **RESUMEN**

En este estudio se presentan los efectos, tanto sobre la movilidad de la población española como sobre el medio ambiente, de las alternativas intermodales AVE-avión resultantes de la construcción de una estación de AVE en el aeropuerto de Madrid-Barajas; para ello se ha desarrollado un modelo de red, a escala peninsular, que incorpora los principales medios de transporte a disposición de un viajero (transporte por carretera, tren, tren de alta velocidad y avión), así como las estimaciones de los respectivos impactos medio-ambientales. Los resultados indican que una mejora de la intermodalidad reduciría de forma importante las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, mejorando al mismo tiempo la movilidad global de la población.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La adecuada integración entre distintos modos es una herramienta fundamental para garantizar la sostenibilidad del sistema de transporte, potenciar su papel como motor de crecimiento económico e instrumento de vertebración territorial, y reducir su impacto medio-ambiental. Recientemente, y como consecuencia del fuerte crecimiento en España de la red de trenes de alta velocidad, se ha anunciado la construcción de una estación de AVE dentro del aeropuerto de Madrid Barajas.

Este estudio se centra en el análisis de las repercusiones de esta obra, sea en cuanto a movilidad de la población española, sea con respecto al impacto medio-ambiental y a la reducción de la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera. Para ello, simulamos el movimiento de viajeros, desde cualquier punto de la superficie peninsular, hasta el aeropuerto de Madrid Barajas, para allí enlazar con un vuelo intercontinental. Los usuarios pueden elegir entre distintos modos de transporte (transporte por carretera, tren, tren de alta velocidad y avión), y se repartirán entre ellos en función de la utilidad de cada uno: esto a su vez dependerá de la hora del día, del coste del viaje, y de los horarios programados para cada medio. La construcción de la nueva estación permitirá, entre otras cosas, reducir considerablemente el coste de desplazarse desde la estación de Atocha hasta Barajas: este estudio pretende estimar dicho impacto.

## 2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

El modelo global utilizado para estudiar el movimiento de personas hasta el aeropuerto de Madrid Barajas se basa en distintas capas: concretamente, una primera capa para la gestión de los horarios de los distintos medios de transporte, otra para representar la utilidad de cada medio para los pasajeros, y una última para la estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### 2.1 Horarios y tiempos de desplazamientos

Un elemento fundamental para la determinación de la utilidad para el pasajero de un medio de transporte es el tiempo necesario para realizar un viaje, teniendo en cuenta tanto el tiempo para el propio recorrido, como el retraso causado por no tener disponibilidad inmediata de ese medio.

Para trenes y aviones, se han tomado como base los horarios oficiales obtenidos respectivamente de las páginas web de Renfe ([www.renfe.es](http://www.renfe.es)) e Iberia ([www.iberia.com](http://www.iberia.com)). Para la modalidad aérea se ha optado por incluir los datos de una única aerolínea: a pesar de que pueda parecer una limitación, esto simplifica la complejidad del problema al no haber necesidad de manejar vuelos dentro de distintas alianzas; además, Iberia representa la mayor parte de los vuelos internacionales que despegan de Madrid Barajas, lo cual justifica la representatividad de esta muestra. Los horarios obtenidos se han utilizado para crear un objeto matemático, desarrollado por los autores (Zanin, 2009), llamado Scheduled Network; este objeto representa una evolución de la teoría de las Redes Complejas (Boccaletti, 2006), inicialmente desarrollada dentro de la matemática, y posteriormente utilizada en la física para el análisis de multitud de sistemas complejos (Costa, 2009). Utilizando Scheduled Networks es posible encontrar, con un bajo coste computacional, cual es el mejor camino entre dos nodos de una red, considerando distintas alternativas con horarios y velocidades diferentes.

El modelado de un viaje en coche es bastante más simple. Cada recorrido entre dos puntos de la geografía española se ha dividido en un primer tramo urbano, con una velocidad media de 30 km/h, y un segundo tramo interurbano a 90 km/h.

Para calcular la hora de salida prevista  $H_s$  desde un punto de España, primero se fija la hora de llegada requerida (en adelante,  $H_l$ ); a continuación, se busca cual es, respectivamente, el mejor tren, AVE y avión que permite llegar a esa hora desde la ciudad más cercana al punto considerado; y finalmente, se añade el tiempo necesario para ir en coche hasta esa estación o aeropuerto. Es importante notar como el tiempo total de viaje incluye dos aportaciones: el tiempo real de desplazamiento, más las esperas que se pueden generar debido a las frecuencias de los medios considerados. Por ejemplo, es posible que se quiera estar en Barajas a las 10:00, y que el trayecto en avión desde una ciudad dada tarde 60 minutos; si la mejor conexión por avión está programada a las 8:30, tenemos 60 minutos de tiempo de desplazamiento, más una espera de otros 30 minutos en Barajas (desde las 9:30, hora de llegada, hasta las 10:00).

Por supuesto el caso de un trayecto completo en coche es más simple, puesto que el usuario puede elegir la hora de salida; sin embargo, se añade un tiempo extra de 30 minutos en concepto de tiempo de aparcamiento en el propio aeropuerto.

## 2.2 Utilidad de los medios de transporte

Una vez obtenidos los tiempos necesarios para los desplazamientos en los distintos medios de transporte, para cada uno de estos se calcula la utilidad para el usuario por medio de la siguiente ecuación:

$$U_m = k_m + \alpha C_m + \beta T_m + \beta' E_m \quad (1)$$

$U_m$  representa la utilidad del medio de transporte  $m$ ,  $k_m$  una constante de preferencia general por ese medio,  $\alpha$  la sensibilidad al coste,  $C_m$  el coste del viaje con ese medio; los tiempos se recogen en los dos últimos términos:  $\beta$  y  $\beta'$  representan la sensibilidad al tiempo de trayecto y al tiempo de espera, mientras que  $T_m$  y  $E_m$  representan respectivamente dichos tiempos (calculados en el apartado 2.1).

Las constantes de preferencias  $k_m$  se han considerado iguales a cero. En la realidad, los usuarios pueden tener distintas preferencias hacia los distintos medios de transporte: por ejemplo, el AVE es más confortable que un tren normal, y a diferencia del avión se permite utilizar teléfonos móviles; además, muchas personas tienen cierta aversión por el avión, o prefieren no dejar el coche en un aparcamiento durante largos periodos de tiempo. Sin embargo, estas apreciaciones son muy subjetivas, y no hemos encontrado en la literatura datos fiables para el tipo de desplazamiento considerado (ir hasta Madrid Barajas para enlazar con un vuelo de largo radio). En todo caso, los sesgos que se introducen por esta modificación son constantes e independientes del tipo de intermodalidad simulado: los resultados cualitativos obtenidos, por consiguiente, representan bien la realidad modelada.

Las sensibilidades a costes, y a los tiempos de viaje y espera se han obtenido de Martín y Nombela (2008), que a su vez se basa en la encuesta de movilidad Movilia (Ministerio de Fomento, 2003). Los valores utilizados son, respectivamente, de  $-0.00712$  (sensibilidad a las tarifas de trenes y aviones),  $-0.018$  (costes de aparcamientos y taxis),  $-0.36$  (tiempos de viaje) y  $-0.1044$  (tiempos de espera).

El coste del trayecto en avión se ha considerado como nulo. En la realidad, las aerolíneas ofrecen precios globales para vuelos enlazados, donde se reduce el coste del tramo nacional (o de concentración de los pasajeros) para fomentar la elección del tramo de largo radio. Esta compleja técnica de tarifación puede llevar a situaciones anormales: por ejemplo, se ha encontrado que el precio para un vuelo de Iberia hasta México DF (ida el 13/03/2010, vuelta el 20/03/2010) desde Madrid Barajas era 707€ mientras que desde Bilbao era menor, en concreto 648€. Aunque este caso no represente la norma, hay que añadir que la percepción de este coste para el usuario puede ser cero: ya sea por ser la elección base y en muchos casos la más natural, o por la imposibilidad de desglosar las tarifas de una forma simple.

Las tarifas utilizadas para el AVE y el tren convencional se han obtenido de la página web de Renfe. Por otro lado, el coste por kilómetro de un coche se ha estimado de 0.2€/Km, en línea con la literatura (Martín y Nombela, 2008).

### 2.3 Distribución de los pasajeros entre los distintos modos

Una vez definida la utilidad de los distintos modos de transporte, los pasajeros se han repartido entre las alternativas posibles según la siguiente ecuación:

$$Prob(m) = \frac{e^{U_m}}{\sum_j e^{U_j}} \quad (1)$$

$Prob(m)$  es la probabilidad de elección del modo de transporte  $m$ , y  $j$  es un índice que recorre todas las posibles alternativas.

Es importante notar como esta probabilidad es dinámica, en cuanto depende del punto geográfico de origen del pasajero y de la hora del día: esta última por medio del horario de los trenes y vuelos.

### 2.4 Modelos de impacto ambiental

Una vez simulado el medio de viaje de los pasajeros, se ha pasado a calcular el impacto ambiental de cada forma de transporte. En este sentido, solo se ha considerado el impacto relativo al cambio climático, y en particular en las emisiones directas de CO<sub>2</sub>; otros efectos negativos, tales como contaminación, ruido, utilización del suelo, etc., y emisiones indirectas (construcción de infraestructuras) se han despreciado.

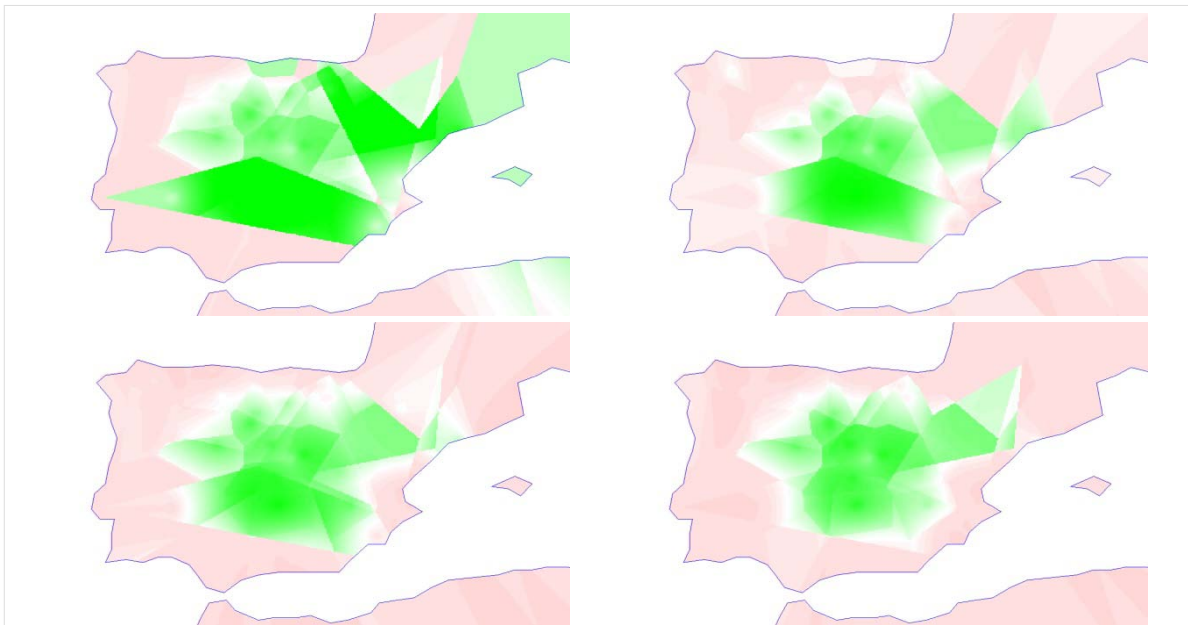
Para los desplazamientos en coche, se han utilizado los resultados previamente publicados por Pérez y Monzón (2008).

Los datos para el transporte ferroviario han sido calculados considerando un factor de ocupación medio del 70%, y utilizando los datos de consumo (en términos de kWh) publicados por Renfe. La energía consumida se ha convertido en cantidad de emisiones por medio del factor de emisión (toneladas de CO<sub>2</sub> por MWh) correspondiente al mix energético español para el mes de Julio de 2009.

En cuanto a los tramos en avión, se han utilizado los datos presentados en el informe de Knörr (2008) sobre tráfico aéreo y ferroviario en Europa.

## 3. RESULTADOS

En las gráficas que siguen (Figura 1 hasta 5) se muestra la evolución de distintas métricas como consecuencia de la construcción de la parada de AVE en Madrid Barajas; observamos que se reducen los tiempos y los costes necesarios para desplazarse desde la estación de Atocha hasta el aeropuerto, aumentando la utilidad del AVE. Todas las Figuras incluyen 4 imágenes, para representar la evolución de los parámetros en función de la hora del día: 4:00, 10:00, 16:00 y 22:00.

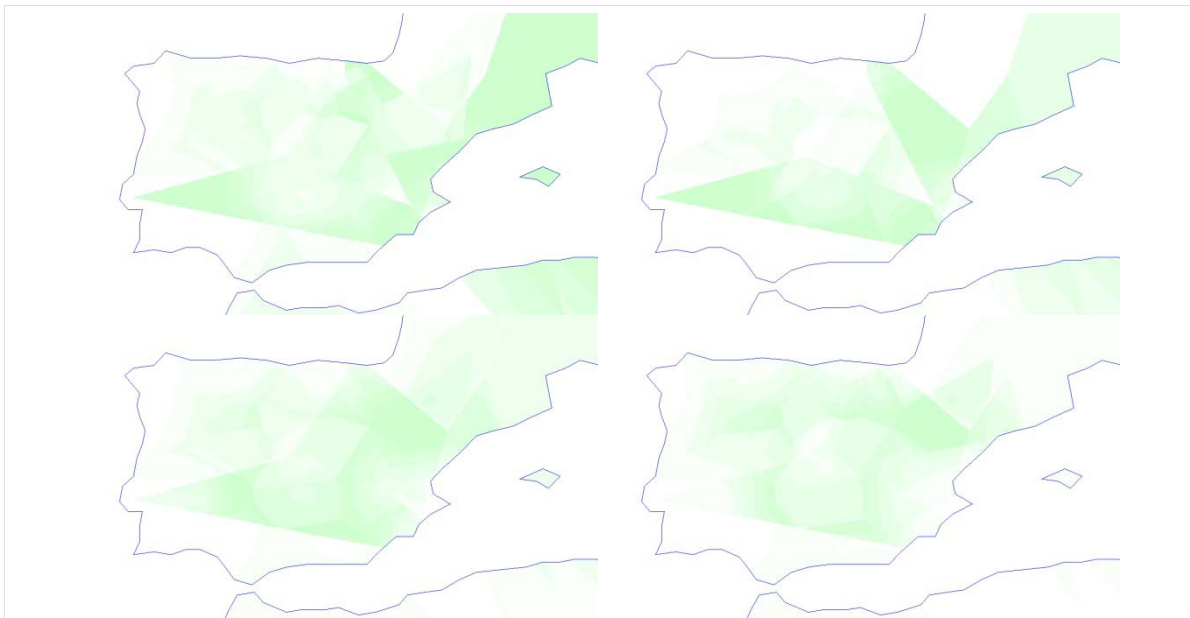


**Fig. 1 – Evolución de la utilidad total.**

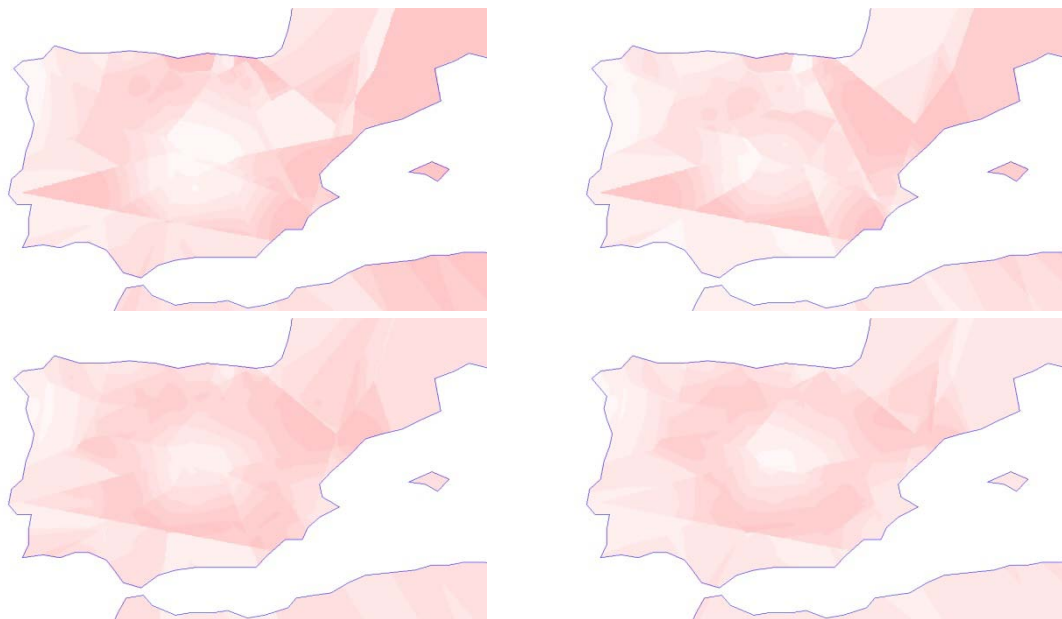
En la Figura 1 se muestra como variarían la utilidad total en cada punto de la geografía española: esta utilidad se define como la media de las utilidades de los distintos medios de transporte, ponderada por el porcentaje de pasajeros que escogerían cada uno de ellos. Tonalidades verdes indican un aumento de la misma, más pronunciado a más intensidad del color; el rojo representa una disminución. Esta utilidad es de interés por ser una medida de la movilidad dentro del territorio.

Hay dos características que es conveniente destacar. Primero, intuitivamente sería de esperar que la utilidad global aumentase, debido a que la utilidad del AVE aumenta como consecuencia de la nueva estación: sin embargo, hay muchas zonas periféricas donde esto no se cumple. En las regiones más alejadas de Madrid, la utilidad del AVE es más baja de la utilidad del avión (que gana debido a su rapidez); si aumenta la utilidad del AVE, habrá más viajeros que opten por este medio de transporte. Esto causa un incremento en la ponderación de la utilidad del AVE en la utilidad total: por consiguiente, el promedio disminuye. Este efecto es realmente consecuencia de haber despreciado la utilidad básica de cada medio; aunque el AVE sea más lento, para muchos viajeros tendrá una utilidad superior al avión, por ejemplo por poder utilizar teléfonos móviles: si se tomara en cuenta este factor, todo el mapa aparecería en tonalidades verdes.

Un segundo aspecto se refiere a la representación gráfica de los resultados. En la Figura 1, así como en las demás, se pueden notar líneas de variación súbita de los parámetros. Esto es el resultado de la forma de buscar los posibles trenes y vuelos: sólo se considera la ciudad más cercana, y se descartan las demás ciudades (a pesar de que puedan estar mejor conectadas). Además, se representan los resultados para todas las regiones incluidas en el mapa, aunque no estén consideradas en el estudio: por ejemplo, Portugal, Francia, las Islas Baleares o la costa septentrional de África. En estos casos, al no estar los aeropuertos y estaciones correspondientes en el modelo, los resultados han de interpretarse como si los pasajeros hubiesen ido en coche hasta la ciudad más cercana incluida en la simulación,



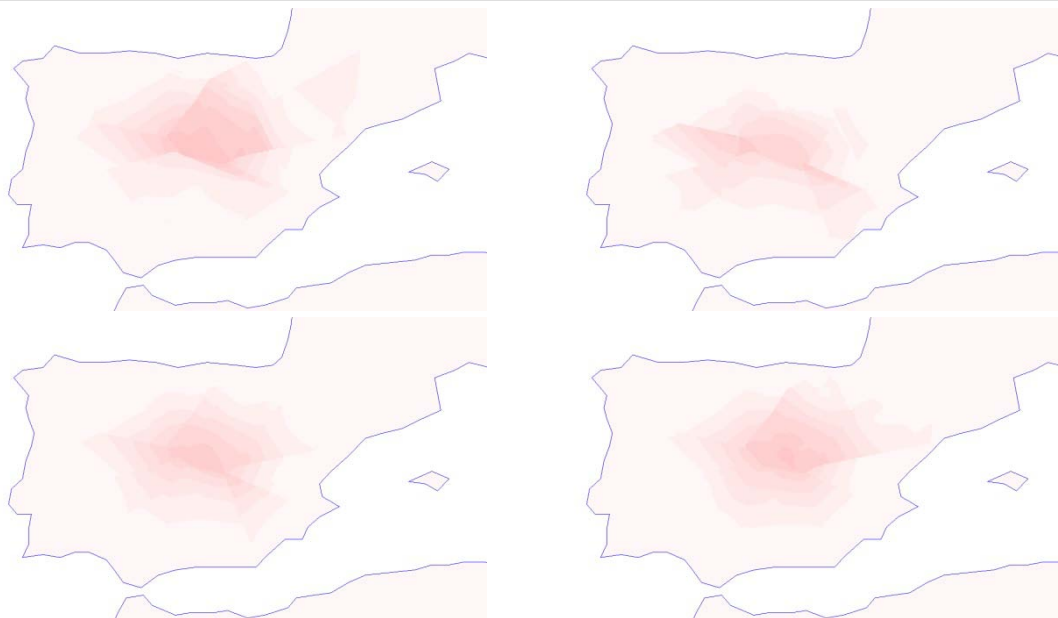
**Fig. 2 – Evolución del número de pasajeros para el AVE.**



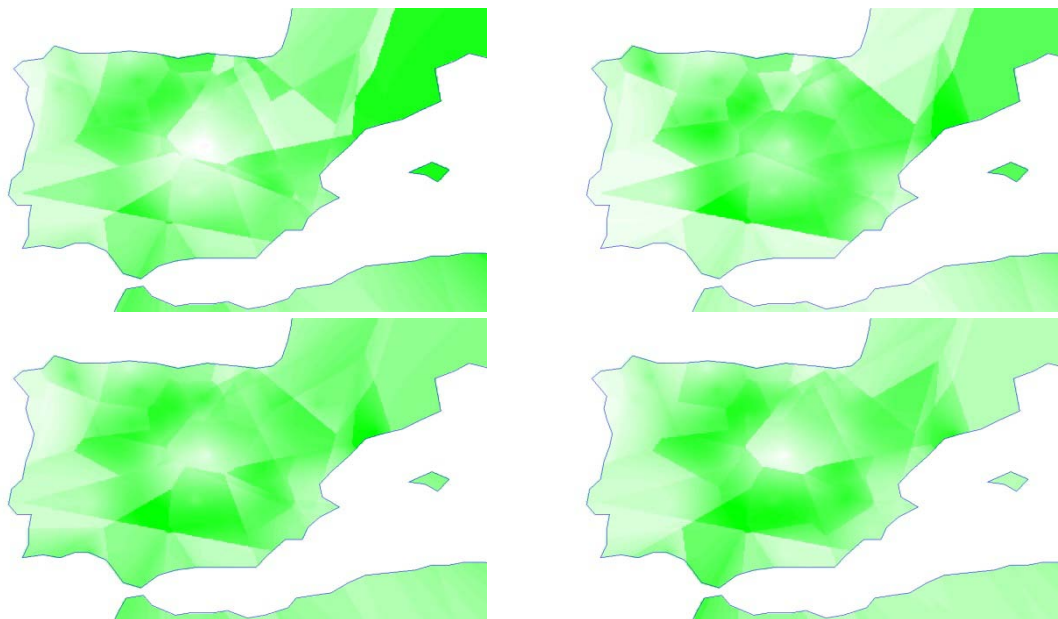
**Fig. 3 – Evolución del número de pasajeros para el avión.**

para enlazar allí con otro medio de transporte.

En las Figuras 2, 3 y 4 está representada la evolución del número de pasajeros para el AVE, el avión y el coche, respectivamente (tonalidades verdes para aumentos, rojas para disminuciones); también en estas Figuras se entiende la evolución como el incremento (o la disminución) de pasajeros como consecuencia de la nueva estación de AVE en Barajas. Gracias al incremento en su utilidad, el AVE gana cuota de mercado, quitándosela al avión en los largos recorridos, y al coche en la zona más periférica de Madrid.



**Fig. 4 – Evolución del número de pasajeros para desplazamientos en coche.**



**Fig. 5 – Evolución de la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida.**

Los resultados de este cambio en las preferencias de los usuarios se reflejan en la Figura 5, como cambios en las cantidades de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera: el color verde que cubre todo el territorio, cuya tonalidad es proporcional a las diferencias de emisiones entre ambos escenarios, indica una fuerte reducción del impacto medio-ambiental gracias a esta medida de intermodalidad.

## **CONCLUSIONES**

En este estudio se ha construido un modelo para simular los efectos de la creación de una nueva estación de AVE en el aeropuerto de Madrid Barajas, en términos de movilidad para los usuarios y de impacto medio-ambiental; en concreto, se estudia el efecto para pasajeros

que quieran enlazar en Barajas con otros vuelos intercontinentales. Los resultados muestran un incremento importante en la cuota de mercado del tren de alta velocidad, con una consiguiente disminución del avión para largos recorridos, y del coche en las zonas periféricas de la capital: como consecuencia, se aprecia una fuerte disminución en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Futuros desarrollos estarán enfocados en la mejora general del modelo, en especial del modelo de distribución de los pasajeros entre los distintos medios. Esto nos permitirá simular cambios puntuales en el sistema, con el objetivo de realizar estudios de tipo *what-if* que permitan optimizar el desarrollo de futuras infraestructuras de transporte.

### **AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación ha sido desarrollada en el marco del proyecto *Integración del transporte aéreo y alta velocidad ferroviaria: impactos sobre accesibilidad y medio ambiente (AERO-AVE)*, financiado por el Ministerio de Fomento y el Ministerio de Ciencia e Innovación, dentro de la Acción Estratégica de Energía y Cambio Climático, Subprograma de Transporte e Infraestructuras del Plan Nacional de I+D+i.

### **REFERENCIAS**

BOCCALETTI, S., LATORA, V., MORENO, Y., CHAVEZ, M. y HWANG, D.-U. (2006). Complex networks: Structure and dynamics, *Physics Reports* 424 (4-5), pp. 175-308.

COSTA, L. da F., OLIVEIRA, O. N. Jr., TRAVIESO, G., RODRIGUES, F. A., BOAS, P. R. V., ANTIQUEIRA, L., VIANA, M. P. y CORREA DA ROCHA, L. E. (2007). Analyzing and Modeling Real-World Phenomena with Complex Networks: A Survey of Applications. E-print arXiv:0711.3199.

KNÖRR, W. (2008) EcoPassenger: Environmental Methodology and Data, Institut für Energie und Umweltforschung.

MARTÍN, J. C. y NOMBELA, G. (2008). Impacto de los nuevos trenes AVE sobre la movilidad. *Revista de Economía Aplicada* 47(16), pp. 5-25.

MINISTERIO DE FOMENTO. Encuesta de movilidad de las personas residentes en España. Movilia, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Madrid, 2003.

PEREZ MARTINEZ, P. J. y MONZON DE CACERES, A. (2008). Consumo de energía por el transporte en España y tendencias de emisión. *Observatorio medioambiental* 11, pp. 127-147.

ZANIN, M., LACASA, L. y CEA, M. (2009). Dynamics in scheduled networks. *Chaos* 19, 023111.