



Diseño de la red española de transportes: ¿decisiones ideológicas o trayectorias dependientes?

Autores y e-mail de la persona de contacto:

Rafael Myro Sánchez (UCM)

Federico Pablo Martí (UAH) Federico.pablo@uah.es

Belén Rey Legidos (UAH)

Departamento: Economía Aplicada II (UCM) y Economía (UAH)

Universidad: Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá

Área Temática: *(indicar el área temática en la que se inscribe el contenido de la comunicación)*

8. Movilidad, transporte e infraestructuras

Resumen: *(máximo 300 palabras)*

La creciente relevancia de Madrid en las infraestructuras se atribuye frecuentemente a condicionantes de orden político más que estrictamente económicos.

En el presente trabajo se cuestiona esta afirmación y se muestra como la estructura radial de las infraestructuras de transporte puede deberse no solamente a decisiones políticas sino también de un proceso secuencial de toma de decisiones no centralizadas cuando los principales núcleos de población se distribuyen en la periferia del territorio.

Para ello se desarrolla un modelo de simulación basado en agentes en el que, utilizando diversos criterios de decisión, los nodos de la red deciden –por criterios puramente económicos- los tramos en los que deben realizarse las inversiones.

Los resultados provisionales obtenidos indican que el diseño final de la red depende en gran medida del proceso de toma de decisiones empleado y de si el diseño es secuencial o por el contrario se realiza de una sola vez. Otros aspectos como el grado de concentración de la población en el territorio o el potencial de aprovechamiento de las inversiones locales por los nodos alejados también pueden tener un impacto apreciable.

Palabras Clave: *(máximo 6 palabras)*

Clasificación JEL: 3 C Métodos matemáticos y cuantitativos

1.- Introducción

La elevada relevancia de Madrid en las infraestructuras españolas se atribuye frecuentemente a condicionantes de orden político más que estrictamente económicos (Albalade y Bel, 2011).

En el presente trabajo se cuestiona esta afirmación y se muestra como la estructura radial de las infraestructuras de transporte puede deberse no solamente a decisiones políticas sin base económica sino también a un proceso secuencial de toma de decisiones racionales no necesariamente realizadas desde una perspectiva centralizada cuando los principales núcleos de población se distribuyen en la periferia del territorio, como es el caso de España.

Para ello se utiliza una aproximación contrafactual en la que se simulan por ordenador las redes de transporte óptimas para cada uno de los nodos que la conforman y a partir de las preferencias reveladas por los agentes construir las redes socialmente óptimas que emergen.

El trabajo se estructura en tres apartados, además de esta introducción. En el primero se desarrolla un modelo de simulación basado en agentes en el que los nodos de la red deciden, utilizando diversos criterios de decisión, los tramos en los que deben realizarse las inversiones. A continuación, y en el mismo epígrafe, se contrasta la validez del modelo aplicándolo reiteradamente sobre redes simples construidas aleatoriamente de los que se extraen resultados generales sobre la influencia de la topología de los núcleos de población en el diseño de las redes de comunicación. En el segundo, se evalúa la idoneidad de la actual red de carreteras de alta capacidad mediante un ejercicio de simulación contrafactual mediante la aplicación del modelo realizado al mapa de los principales núcleos de población españoles en el siglo XVI y en la actualidad. Finalmente, en el tercero se presentan las principales conclusiones.

2.- Un modelo de simulación basado en agentes para el diseño de redes óptimas de transporte

No parece adecuado hablar de una red de transporte óptima sino de muchas ya que la consideración como tal depende tanto de los objetivos marcados como de los agentes

decisiones. Así, el resultado final vendrá determinado por el proceso de toma de decisiones y, en general, por el sistema de agregación de preferencias utilizado.

Como la determinación del criterio a optimizar y del sistema de toma de decisiones suele ser muy subjetivo, se optó por desarrollar un modelo general que permitiera evaluar mediante un análisis contrafactual la mayoría de ellos con el objetivo de obtener conclusiones que fueran válidas en un espectro de situaciones lo más amplio posible.

Adicionalmente, dado que el diseño de las infraestructuras tiene una clara dependencia de la trayectoria de decisiones (*path dependence*) se incluyó la posibilidad de que la red fuera diseñada en una sola vez o se realizara en ampliaciones sucesivas.

La aplicación del análisis contrafactual mediante simulaciones por ordenador en el estudio de las redes de transporte aunque todavía incipiente está experimentando un rápido crecimiento en los últimos años.

Este tipo de aproximaciones han sido en el pasado objeto de dos importantes críticas pero actualmente han dejado de ser válidas en gran medida (Casson, 2009).

Frecuentemente se ha aducido que las simulaciones por ordenador no pueden contar con el suficiente detalle para que el contrafactual permita una comparación fiable con la realidad. Sin embargo, la disponibilidad actual de fuentes de información y de capacidad de cálculo hace posible plenamente llevar a cabo esta tarea.

En línea con la anterior, se ha señalado que la simulación no permite acercarse suficientemente a la realidad ya que ignora importantes limitaciones físicas o tecnológicas que pueden alterar gravemente el análisis. Esta crítica no tiene en cuenta una de las características más positivas de esta aproximación y es que la simulación permite incorporar nuevas restricciones a medida en que vayan siendo necesarias sin que por ello haya que alterar sustancialmente el marco conceptual.

En general la simulación por ordenador parece una forma adecuada para analizar la formación y evolución de redes de transporte especialmente en entornos con escasa información como es el caso del análisis histórico.

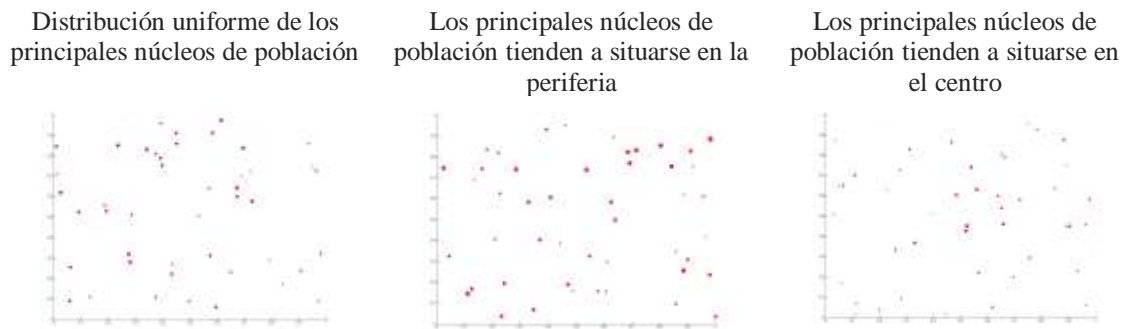
El software desarrollado para dar respuesta a las cuestiones planteadas ha sido elaborado en MATLAB.

2.1.- La generación de la red inicial

El modelo parte de la definición de un conjunto de N nodos conectados por diversos enlaces y que conforman la red inicial. Los enlaces están dotados de una cierta carga, que se expresa en términos de tiempo, pero que también puede hacerse en términos de distancia o coste. El número máximo de nodos solo está limitado por la memoria del ordenador.

La distribución de los nodos puede realizarse mediante un algoritmo matemático que permita el estudio de diferentes estructuras topológicas o, para el análisis aplicado, mediante la carga de mapas preelaborados en formato SHP. En la figura se muestra tres ejemplos de distribuciones de nodos o núcleos de población teóricos. El grosor de los puntos representa el tamaño de la población, o de cualquier otra variable como la renta que quiera utilizarse en los criterios de ponderación para la toma de decisiones.

Figura 1.- Creación de mapas aleatorios de núcleos urbanos

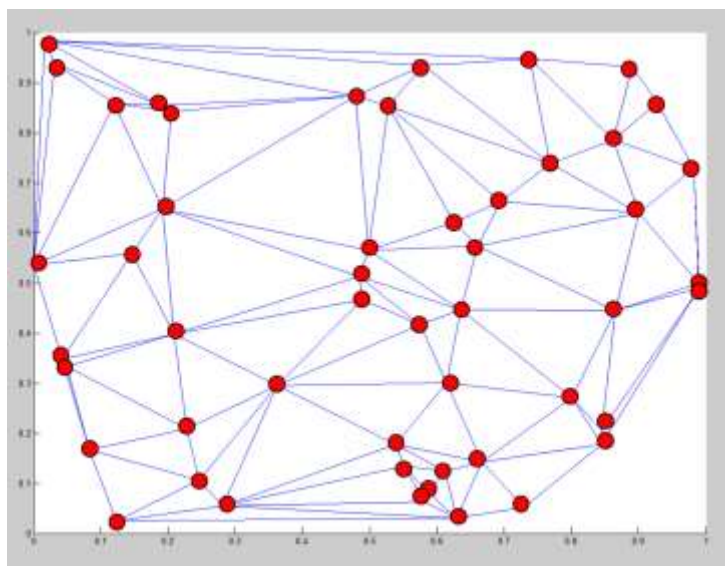


Fuente: Elaboración propia.

Si no se dispone de información suficiente sobre la red inicial puede construirse una artificialmente a partir de los nodos utilizando la hipótesis de que las modernas redes de comunicaciones se basan en las vías locales que unían en el pasado las poblaciones cercanas.

La plasmación matemática de esta hipótesis la constituye la triangulación de Delaunay (Delaunay, 1934). Mediante este proceso se forman triángulos caracterizados por que la circunferencia circunscrita de cada uno de ellos es vacía; es decir, no contiene vértices de ningún otro triángulo con lo que se asegura que los ángulos interiores son lo más grandes posibles. Esta triangulación es la que genera una red más eficiente y la que de forma natural se formaba en los caminos entre las poblaciones (figura 2).

Figura 2.- Generación aleatoria de puntos y creación de una red potencial mediante triangulación de Delaunay



Fuente: Elaboración propia.

Esta simplificación en el diseño de la red inicial parece adecuada hasta el desarrollo de sistemas de transporte que ponen en contacto núcleos importantes sin pasar por otros intermedios de menor entidad, como es el caso de las autopistas o, más claramente, el tren de alta velocidad o el avión. Sin embargo, la utilización de la triangulación de Delaunay no supone una pérdida de generalidad ya que se pueden considerar redes superpuestas de distinto nivel (por ejemplo: redes locales que unan las poblaciones grandes con las pequeñas que la circundan junto con una red de larga distancia que una los grandes núcleos). En todo caso, siempre es posible ampliar suficientemente el número de segmentos que unen los nodos hasta alcanzar la red inicial requerida ya que como se ha señalado anteriormente no existen restricciones técnicas para ello.

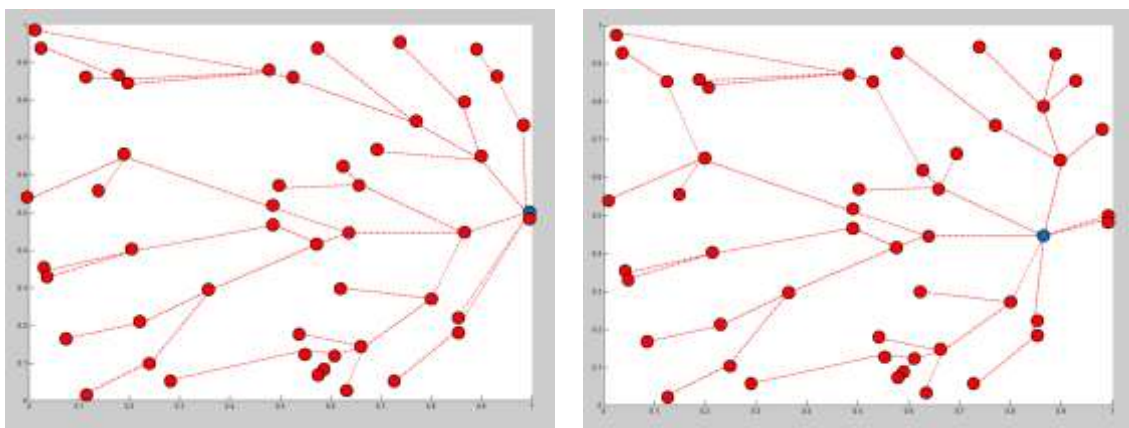
2.2.- La generación de las rutas óptimas

Una vez que se cuenta con una red inicial es necesario determinar las rutas que minimizan los costes de viaje entre cada uno de los nodos para, en base a ello, determinar cuál es el enlace que resulta más ventajoso mejorar ya que su influencia en el conjunto de la red es mayor.

Esta tarea se realiza aplicando el algoritmo Dijkstra, o de caminos mínimos (Dijkstra, 1959). Mediante él se exploran las distintas rutas alternativas que unen dos puntos y se

selecciona la que supone un menor coste. En la figura 3 se muestran como ejemplo los resultados obtenidos para dos nodos. Aunque ambos nodos son contiguos las redes óptimas son significativamente diferentes entre ellos poniendo de manifiesto la relevancia del agente decisor en el diseño de la red.

Figura 3.- Cálculo de las redes óptimas para dos puntos mediante el algoritmos Dijkstra



Fuente: Elaboración propia.

2.3.- Los criterios de decisión

Una vez definidas las redes óptimas de cada nodo cada uno de ellos determina cual es el enlace o tramo que preferiría que se mejorase. La elección del tramo depende del efecto directo en los costes de desplazamiento entre los nodos que lo conforman pero también, en los de todos los caminos óptimos que lo utilizan.

Una vez escogido el tramo se lleva a cabo un proceso de votación en el que los agentes, en este caso los nodos, seleccionan el tramo que consideran que tiene un efecto más positivo sobre todos ellos.

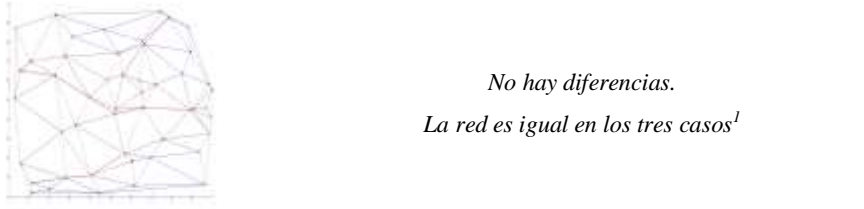
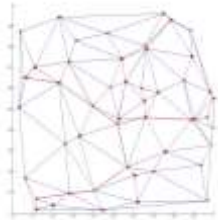
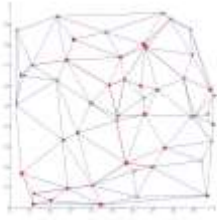
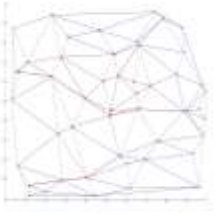
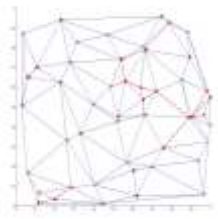
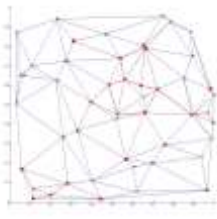
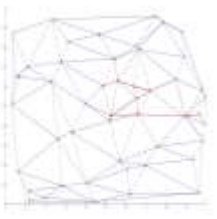
Las ponderaciones pueden ser simples o ponderadas por población o renta. También pueden ser competitivas o estar realizadas por uno o varios agentes regionales que representan a los nodos de su territorio.

Como se dijo anteriormente, la elección del criterio es en absoluto irrelevante.

Así por ejemplo, una elección realizada por todos los nodos sin ponderar dará lugar a una red óptima para la transmisión de noticias en un país en el que no existen infraestructuras de telecomunicación y la información debía realizarse a caballo o mediante palomas mensajeras. Sin embargo, será inadecuada para potenciar la actividad comercial entre los grandes núcleos de población ya que este criterio no tiene en consideración la importancia del tráfico entre los nodos.

En la figura 4 se muestran a modo de ejemplo las redes de transporte óptimas obtenidas para una misma distribución de nodos dependiendo de cómo se distribuya entre ellos la población y de los criterios de ponderación utilizados.

Figura 3.- Ejemplo de creación de redes

	Distribución uniforme de los principales núcleos de población	Los principales núcleos de población tienden a situarse en la periferia	Los principales núcleos de población tienden a situarse en el centro
No ponderada por la población.	 <p style="text-align: center;"><i>No hay diferencias. La red es igual en los tres casos¹</i></p>		
Ponderada por la población.			
Ponderada por el tráfico. Modelo gravitacional que depende de la población de los nodos y de la distancia que los separa.			

Fuente: Elaboración propia.

3.- Análisis topológico del papel de la centralidad en la red de transporte española

Una vez comprobado que no existían problemas en el software mediante múltiples simulaciones en entornos diversos se aplicó el modelo al caso de España para el siglo XVI, momento en el que Madrid se constituye en capital del imperio español, y en la actualidad. Como nodos se seleccionaron los núcleos de los municipios peninsulares que en la actualidad cuentan con más de 50.000 habitantes a los que se añadió Teruel por su carácter de capital de provincia.

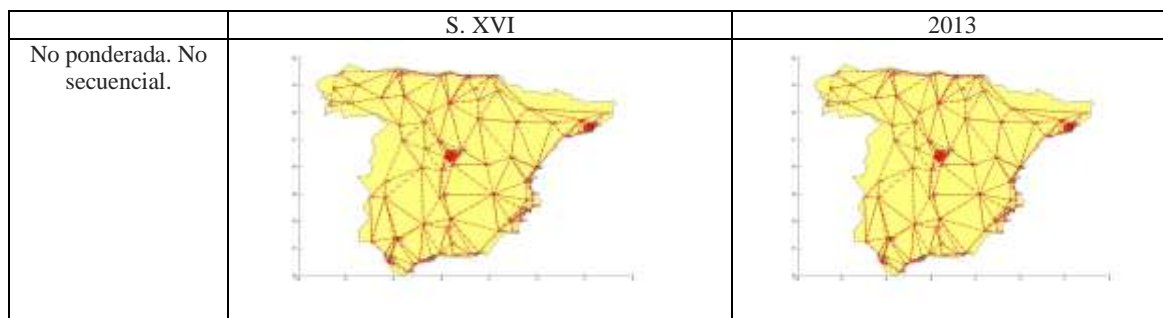
La red inicial se definió mediante una triangulación de Delaunay a la que se sustrajeron los enlaces que transcurrían por fuera del territorio debido a la existencia de concavidades.

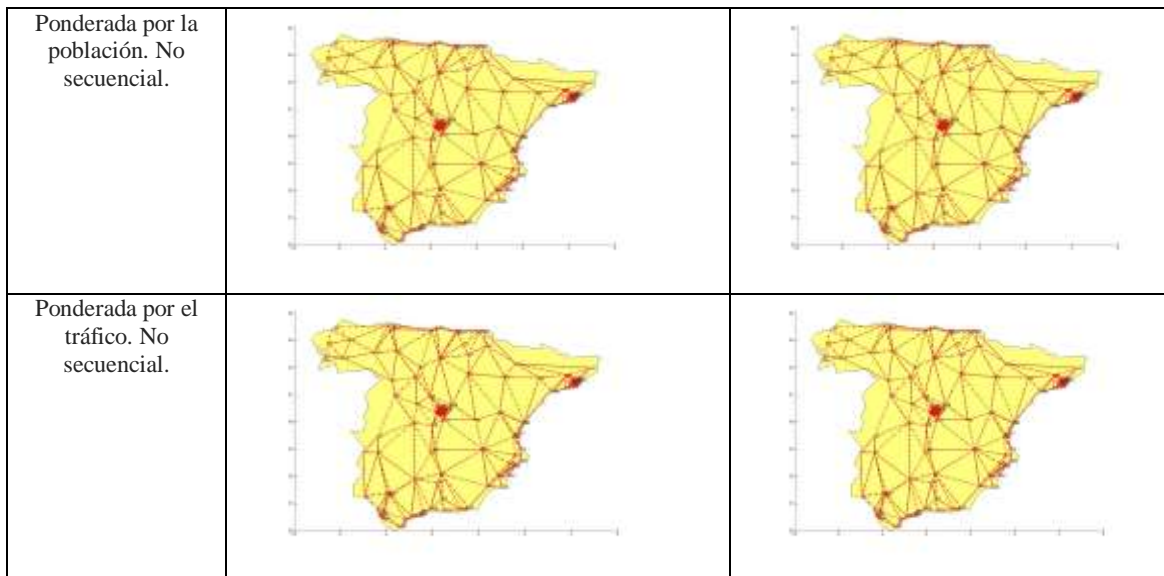
En las simulaciones realizadas se hizo que los tramos mejorados redujeran su carga (tiempo) en un 75% respecto a su situación inicial. En la figura 4 se muestran los resultados obtenidos con votación no ponderada, votación ponderada por la población del nodo y votación no ponderada por población pero considerando los tráficos esperados calculados a partir de un modelo gravitacional que depende proporcionalmente de las masas de los nodos involucrados e inversamente de la distancia que los separa al cuadrado. La constante gravitacional utilizada es inicialmente uno, al no disponer de información adecuada sobre el efecto de la distancia sobre la intensidad del comercio doméstico especialmente en lo referido al siglo XVI. Modificaciones en la constante gravitatoria generan redes que ponderan más o menos la conexión de nodos cercanos o lejanos.

En esta versión del trabajo, los agentes que realizan las votaciones coinciden con los nodos, pero como se indicó anteriormente puede referirse a entes que optimizan la utilidad derivada de la red para un conjunto de nodos. Los agentes buscan maximizar los beneficios derivados de la red y no existen comportamientos estratégicos o colusivos.

Los agentes declaran sus prioridades y se seleccionan los tramos de red más votados. Primero, se selecciona el tramo que tiene más apoyos. A continuación, los agentes vuelven a votar entre el resto de los tramos y así, sucesivamente, se seleccionan los tramos hasta que se agota el presupuesto establecido. Se trata de la determinación conjunta por parte de los agentes involucrados de una mejora de la red acometida en un solo paso. Las mejoras de accesibilidad en la red derivadas de las inversiones en los tramos se pondrán de manifiesto, por lo tanto, de forma simultánea al finalizar las obras.

Figura 4.- Estimación de redes óptimas para España

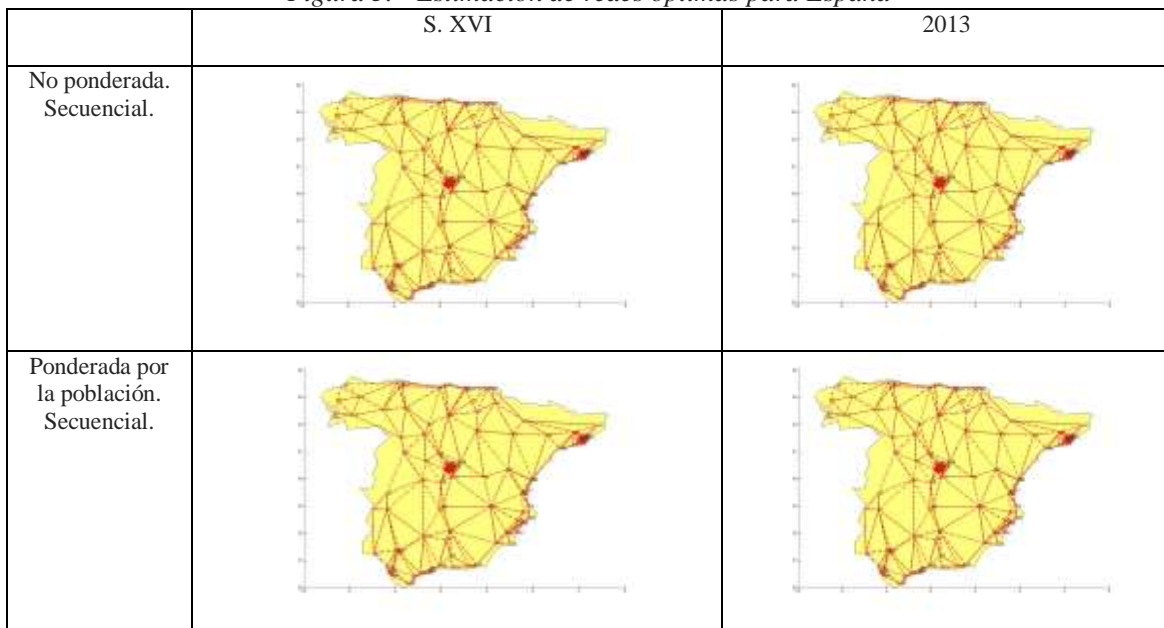


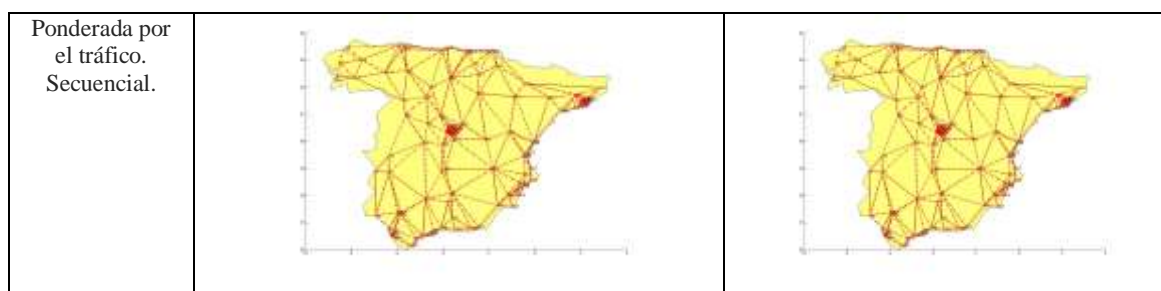


Fuente: Elaboración propia.

Frecuentemente las modificaciones de la red no se realizan simultáneamente sino que son fruto de un proceso secuencial en el que las primeras inversión realizadas afectan a las decisiones posteriores en un claro ejemplo de *path dependence*. Para considerar esta posibilidad se realizó otra serie de simulaciones en las que las votaciones se realizaban al acabar cada uno de los tramos. En la figura 5 se recogen los resultados obtenidos en el caso de este proceso de decisión secuencial.

Figura 5.- Estimación de redes óptimas para España





Fuente: Elaboración propia.

4.- Principales resultados y conclusiones

En general, puede afirmarse a partir de los resultados provisionales obtenidos que la hipótesis de que el diseño final de la red depende en gran medida del proceso de toma de decisiones empleado y de si el diseño es secuencial o por el contrario se realiza de una sola vez es acertada. Otros aspectos como el grado de concentración de la población en el territorio o el potencial de aprovechamiento de las inversiones locales por los nodos alejados también pueden tener un impacto apreciable.

5.- Bibliografía

Albalade, S y Bel, G. (2011): “Cuando la economía no importa: auge y esplendor de la alta velocidad en España”, *Revista de Economía Aplicada*, nº: 55 (vol. XIX), págs. 171 a 190.

Álvarez, E.; Franch, X. y Martí-Henneberg, J. (2013): “Evolution of the Territorial Coverage of the Railway Network and its Influence on Population Growth: The Case of England and Wales, 1871–1931”, *Historical Methods: A Journal of Quantitative and Interdisciplinary History*, July-September. Vol.: 46, nº: 3, págs.: 175-191.

Barrat, A.; Barthélemy, M.; Pastor-Satorras, R. y Vespignani A. (2004): “The architecture of complex weighted networks”. *PNAS*, vol. 101, nº: 11, págs.: 3747-3752.

Blumenfeld-Lieberthal, E. (2009): “The Topology of Transportation Networks: A Comparison Between Different Economies””, *Networks and Spatial Economics*, nº: 9, págs.: 427-458.

- Casson, M. (2009): “The Efficiency of the Victorian British Railway Network: A Counterfactual Analysis”, *Networks and Spatial Economics*, n°: 9, págs.: 339-378.
- Costa, L. da F.; Rodrigues, F.A.; Travieso, G y Villas Boas, P.R. (2008) “Characterization of Complex Networks- A Survey of measurements” *Advances in Physics*, Vol.: 56, n°: 1. págs.: 167-242.
- Delaunay, B. (1934): “Sur la sphere vide. A la memoire de Georges Voronoi”, *Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk* (Bulletin of Academy of Sciences of the USSR), n°: 7, págs.: 793-800.
- Dijkstra, E. W. (1959): "A note on two problems in connexion with graphs", *Numerische Mathematik*, n° :1, págs.: 269–271.
- Drake, J.A. (2010): “Design of Road Networks” Proceedings of the 45th Annual Conference of the ORSNZ, November.
- Erath, A.; Löchl, M. y Axhausen, K.W. (2009): “Graph-Theoretical Analysis of the Swiss Road and Railway Networks Over Time”, *Networks and Spatial Economics*, n°: 9, págs.: 379-400.
- Kumar Pan, R y Saramäki, J. (2011): “Path lengths, correlations, and centrality in temporal networks, *Physical Review E*. n°: 84, 016105.
- Lamer, S.; Gehlsen, B. y Helbing, D. (2006): “Scaling laws in the spatial structure of urban road networks”, *Physica A*, n°: 363, págs.: 89–95.
- Levinson, D. (2009): “Introduction to the Special Issue on the Evolution of Transportation Network Infrastructure”, *Networks and Spatial Economics*, n°: 9, págs.: 289-290.
- Nadal, J. (1984): *La población española (siglos XVI a XX)*. Ariel.
- Sienkiewicz, J. y Holyst, J.A. (2008): “Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland”, *Physical Review E*. n°: 72, 046127.
- Sun, J.; Baciú, G.; Yu, X. y Green, M. (2002): “Template-Based Generation of Road Networks for Virtual City Modeling”, VRST '02, November 11-13, Hong Kong.
- Wang, J.; Mo, H.; Wang, F. y Jin, F. (2011): “Exploring the network structure and nodal centrality of China’s air transport network: A complex network approach”, *Journal of Transport Geography*, n°: 19, Págs.: 712-721.

- Xie, F. y Levinson, D. (2009a): “Modeling the Growth of Transportation Networks: A Comprehensive Review”, *Networks and Spatial Economics*, nº: 9, págs.: 291-307.
- Xie, F. y Levinson, D. (2009b): “Jurisdictional Control and Network Growth”, *Networks and Spatial Economics*, nº: 9, págs.: 459-483.
- Wu, Z.; Braunstein, L.; Havlin, S.; y Stanley, H.E. (2006): “Transport in weighted networks: Partition into superhighways and roads”, *Physical Review Letters*, nº: 96. 148702.
- Yerra, B.M. y Levinson, D.M. (2005): “The emergence of hierarchy in transportation networks”, *The Annals of Regional Science*, nº: 39, págs.: 541-553.