



PLANIFICACIÓN DEL DESPLIEGUE DE LAS ESTACIONES DE SERVICIO DE HIDRÓGENO NECESARIAS PARA FACILITAR EL USO DE ESTE GAS COMO COMBUSTIBLE EN ANDALUCÍA



Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía IDEA
CONSEJERÍA DE EMPLEO, EMPRESA Y COMERCIO



Unión Europea

Fondo Europeo
de Desarrollo Regional



Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía IDEA
CONSEJERÍA DE EMPLEO, EMPRESA Y COMERCIO



Unión Europea

Fondo Europeo
de Desarrollo Regional

Esta actuación está
financiada por la Subvención
Global Innovación-Tecnología-Empresa
de Andalucía 2007-2013,
cofinanciada en un 80% por el
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
e incorporada en el Programa Operativo
FEDER Andalucía 2007-2013

Este documento es propiedad de la Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía
IDEA

Documento elaborado por la Universidad Pablo de Olavide para la Asociación Española
del Hidrógeno. Noviembre 2015

Se citan a continuación los autores del documento:

Raúl Brey Sánchez

José Javier Brey Sánchez

Ana Fernández Carazo

Inmaculada Rodríguez Puerta

A \tilde{e} H₂



Resumen ejecutivo

- Atendiendo al análisis multicriterio realizado, la zona occidental de Andalucía constituye una zona inicial preferentes para el despliegue inicial de una red de estaciones de servicio de hidrógeno (ESH).
- El despliegue presentado en este documento propone situar en una Fase Inicial del despliegue un mínimo de 6, 5, 5 y 4 ESH en Sevilla, Málaga, Córdoba y Jerez de la Frontera, respectivamente.
- Diez municipios serían empleados en fases posteriores para mejorar la interconexión entre los cuatro municipios anteriores, así como con el resto de España: Arcos de la Frontera, Écija, Antequera, Carmona. San Roque, Lucena, Medina-Sidonia, Marbella, Andújar y Jaén.
- Para los nodos principales se propone establecer ESH dispensadoras de hidrógeno comprimido a 700 bar, con almacenamiento y 2 surtidores, las cuales serán abastecidas en cada municipio mediante una planta de producción de hidrógeno de 7,000 kg/día de capacidad. En el caso de los municipios de interconexión, se emplearía en cada uno una ESH dispensado a 700 bar producido “in situ” con capacidad de 1,000 kg/día y 4 surtidores.
- El despliegue de las 30 ESH presentado, incluyendo las plantas de producción de hidrógeno, alcanzaría un coste aproximado de 126 millones de euros.
- Los beneficios medioambientales en términos de emisiones de CO₂ evitadas por el despliegue se situarían alrededor de las 228,000 toneladas de CO₂ anuales.

Contenido

1. Introducción	5
2. Análisis de las unidades espaciales que componen el territorio andaluz.	10
3. Análisis del despliegue de estaciones de servicio de hidrógeno en los municipios más relevantes	14
4. Análisis del tráfico de las carreteras en Andalucía	19
5. Propuesta de estrategia de despliegue	20
6. Análisis de costes y medioambiental	22
7. Conclusiones	24
8. Bibliografía	25
ANEXO I.....	28
ANEXO II.....	31

1. Introducción.

El actual sistema energético basado en el empleo de combustibles fósiles conlleva dos problemas fundamentales que afectan a su propia supervivencia: dependencia de recursos externos y progresivo deterioro medioambiental. Esta insostenibilidad está llevando, en las últimas décadas, a la búsqueda de modelos energéticos alternativos menos contaminantes y que reduzcan la dependencia energética del exterior.

Una de las vías más esperanzadora es la denominada “Economía del Hidrógeno” [1, 2], basada en la utilización del hidrógeno como transportador de energía. generada a partir de fuentes renovables.

La Economía del Hidrógeno constituye un esquema nuevo, en el que, a través de recursos locales, se puede producir combustible para el transporte desde diversas fuentes, y transportarlo y almacenarlo de modo seguro. De este modo, se mejoran las balanzas de pagos, se disminuye la fuerte dependencia energética de recursos derivados de los combustibles fósiles y se reducen las emisiones nocivas producidas por el sector transporte. Más aún, si el origen de ese hidrógeno son las fuentes de energía renovable, entonces la apuesta por su utilización se convierte en una apuesta por la sostenibilidad, y por la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero

Esta búsqueda de un nuevo paradigma tiene sentido especialmente en el caso del sector transporte andaluz por diversos motivos:

1. El sector transporte es el sector de actividad más consumidor de energía en el año 2012 en Andalucía (34'8% del total) [3],
2. La región andaluza posee actualmente un modelo energético caracterizado por una alta dependencia de las importaciones de energía del exterior (el grado de autoabastecimiento en 2012 se situó en el 17'3%) y un predominio de las fuentes energéticas basadas en combustibles fósiles, especialmente petróleo y gas natural (en el año 2012, estas dos fuentes de energía representaron en Andalucía alrededor de un 75'6% del consumo de energía primaria) [3].
3. Andalucía dispone de un gran potencial de energías renovables que permiten optar a modelos energéticos alternativos [4].

Sin embargo, uno de los obstáculos más importantes para el desarrollo de este nuevo modelo energético alternativo en el caso del sector transporte es el denominado “problema del huevo y la gallina”:

1. Los usuarios no adquirirán un vehículo que emplee un combustible alternativo mientras no tengan la capacidad de repostarlo con un mínimo de comodidad, es decir, sin contar con una infraestructura mínima.
2. Los fabricantes de vehículos no producirán esos vehículos mientras no tengan demanda.
3. Ninguna empresa desplegará estaciones de repostaje de esos combustibles alternativos sin tener un mínimo de clientes potenciales.

Por tanto, para iniciar la transición del mercado hacia vehículos de hidrógeno (VH) es necesario planificar el desarrollo inicial de las infraestructuras que permita solventar este problema.

La importancia de esta planificación para lograr la introducción en el mercado de estos vehículos se pone de manifiesto, en el ámbito europeo, en dos acontecimientos recientes de gran relevancia:

1. Por un lado, el 08/09/2009, 7 de los más importantes fabricantes de coches (Daimler, Ford, General Motors, Honda, Hyundai-Kia, Renault-Nissan y Toyota) firmaron un acuerdo de intenciones (Letter of understanding on the development and market introduction of fuel cell vehicles [5]) en que el anticipan que para 2015 empezará a comercializarse un número significativo de VH.

En este acuerdo, los fabricantes establecen que para lograr una exitosa introducción en el mercado de los VH, esta introducción en el mercado debe ir acompañada de la infraestructura de hidrógeno necesaria. Por tanto, los firmantes reclaman el desarrollo de una red de infraestructura de hidrógeno con suficiente densidad para 2015. Además, también sostiene que esta red debería ser construida partiendo de las áreas metropolitanas para posteriormente aumentar la cobertura mediante corredores.

El 08/09/2009 (un día después), empresas líderes tales como Daimler, EnBW, Linde, OMV, Shell, Total y Vattenfall firmaron un acuerdo de intenciones con el

National Organisation Hydrogen and Fuel Cell Technology de Alemania, organismo del Ministerio alemán de Transportes, Obras Públicas y Urbanismo, para el desarrollo de una red de estaciones de servicio de hidrógeno (ESH) en Alemania. En este acuerdo, se establecen dos fases con el propósito de dar cobertura a todo el país y permitir así la comercialización en Alemania de vehículos de hidrógeno para 2015.

2. El segundo acontecimiento que marca la apuesta por el hidrógeno como opción sólida es la recientemente aprobada Directiva 2014/94/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de octubre de 2014, relativa a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos [6]. Esta Directiva surge de la necesidad de fomentar acciones que permitan garantizar la seguridad del suministro energético y la competitividad de sectores clave de la economía europea, como lo son diferentes ámbitos industriales del transporte (naval, automóvil, etc.), contribuyendo al crecimiento económico y a la generación de empleo.

Los combustibles alternativos, entre los que se identifica el hidrógeno, tienen el potencial para sustituir al petróleo. La Directiva se centra fundamentalmente en tres combustibles alternativos: gas natural, electricidad (vehículo eléctrico) e hidrógeno.

La Directiva promueve el establecimiento de un marco de guía para el desarrollo tecnológico y la inversión en el despliegue de estos combustibles alternativos, dando confianza al consumidor, para lo que promueve la necesidad de una cobertura suficiente de infraestructuras.

En el caso del hidrógeno, y del transporte por carretera, en aquellos países que voluntariamente promuevan el despliegue de infraestructuras, la Directiva establece que es necesario asegurar un número suficiente de puntos de suministro, accesibles al público, para permitir la circulación y fomentar el uso de los VH. La cobertura de aglomeraciones urbanas requerirá un cierto número de puntos de suministro adicionales.

En ambos casos se habla de la necesidad de una infraestructura, pero no se proporciona información sobre cómo se ha de realizar este despliegue, más allá de la necesidad de centrar la atención en las ciudades y en permitir los desplazamientos entre ellas. Evidentemente, la manera en la que se efectúe este despliegue influirá en gran medida en el éxito o el fracaso del despegue del hidrógeno como combustible. En este contexto, este documento pretende definir una estrategia de despliegue inicial de ESH en Andalucía para facilitar la introducción en el mercado de los VH.

Países como Alemania o el Reino Unido han definido ya una estrategia de despliegue. En el caso de Alemania [7], 400 ESH serán puestas en servicio para 2023, 100 de las cuales entrarán en servicio en 2017. El despliegue en este caso empezará a partir de las infraestructuras existentes y gradualmente se expandirá hacia las zonas de una menor demanda, dando cobertura a la mayor parte de Alemania para 2023. Se han planificado 10 ESH para cada una de las 6 áreas metropolitanas representadas en la Figura 1, y las estaciones situadas a lo largo de las carreteras nacionales y los corredores de hidrógeno servirán para posibilitar los desplazamientos a lo largo de Alemania.

En el caso del Reino Unido [8], se ha programado el establecimiento de alrededor 65 estaciones para 2020, de 300 para 2025, y 1150 para 2030. La planificación del despliegue se ha realizado atendiendo a los niveles de población, ingresos y densidades de tráfico existentes en las diferentes áreas del Reino Unido. Esta estrategia de despliegue aparece representada en la Figura 2.

En ambos casos, las estrategias de despliegue han sido definidas basándose en los dos ejes comentados anteriormente de ciudades e interconexiones. Éste será también el eje vertebrador en el caso de la planificación del despliegue inicial de infraestructuras de hidrógeno en el caso de la Comunidad Autónoma de Andalucía.

Figura 1. Estrategia de despliegue de ESH en Alemania. Fuente: [7]

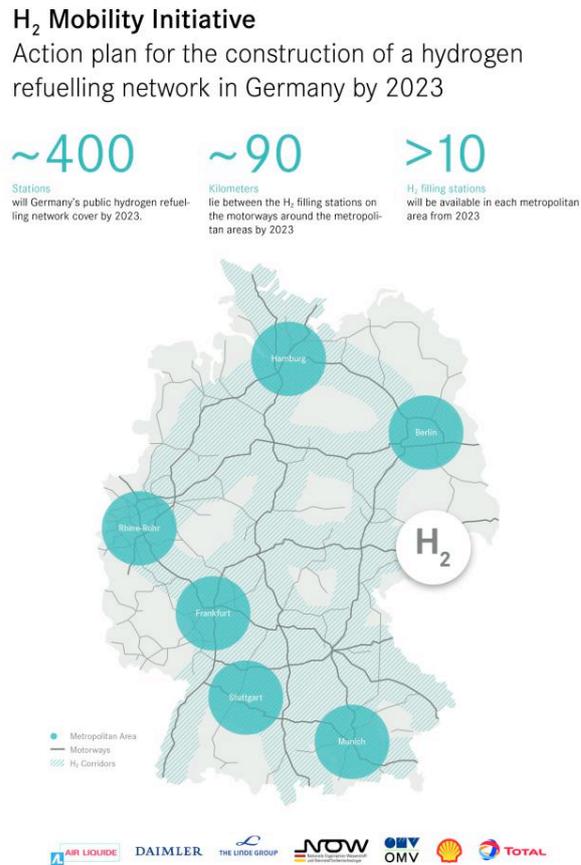
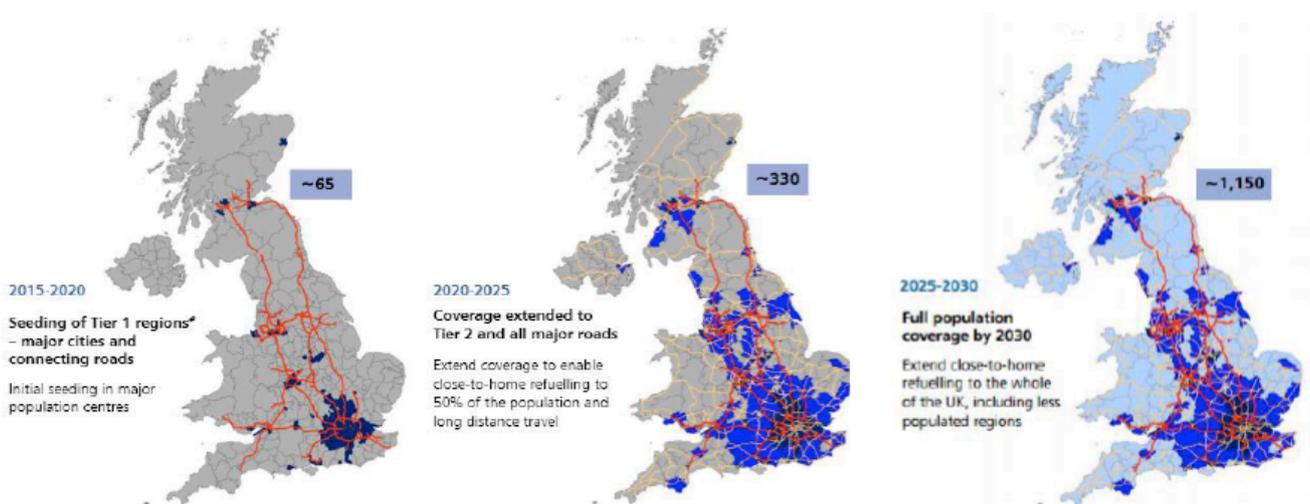


Figura 2. Estrategia de despliegue de ESH en el Reino Unido. Fuente: [8]



2. Análisis de las unidades espaciales que componen el territorio andaluz.

Este análisis se basa en Brey et al. [9]. Para la planificación del despliegue de ESH en Andalucía estos autores consideran como unidad territorial mínima el municipio. La adopción del municipio como unidad espacial da lugar a una división de Andalucía en 770 municipios¹, lo cual constituye una discretización adecuada del territorio andaluz, y permite la consideración de las economías locales (como es sugerido en [4]) y la identificación de las autoridades políticas que deben tomar las decisiones.

Para la realización de la planificación se parten de una serie de supuestos:

- Los primeros usuarios de hidrógeno no se distribuirán de forma homogénea por todo el territorio andaluz, sino que estarán más o menos concentrados en determinadas municipios, siendo por tanto necesario identificar esos municipios más “idóneos” para el establecimiento de ESH.
- Este concepto de idoneidad presenta dos características clave: no es estático, en el sentido de que depende de la fase de despliegue considerada, y viene determinado por diversos criterios.
- La penetración de VH en Andalucía será progresiva. A medida que pase el tiempo, aumentará el número de vehículos de hidrógeno y, con él, el número de ESH necesario para abastecerlos y el número de municipios que se involucrarán en la Economía del Hidrógeno.

En relación al concepto de municipio “idóneo” para el establecimiento de ESH, el carácter no estático se refiere a que dependerá estrechamente de la fase del proceso de despliegue. De este modo, zonas consideradas como idóneas para la ubicación de estaciones de hidrógeno en fases avanzadas del proceso de despliegue pueden no ser consideradas como tales en las fases iniciales. En este trabajo se consideran fases iniciales del proceso de despliegue.

Aunque las zonas idóneas pueden escogerse atendiendo a un solo criterio (monocriterio), asimilándolas por ejemplo al número de vehículos actuales en las diferentes zonas, resulta más adecuado definir el concepto de idoneidad de una forma más amplia mediante el empleo de varios criterios [10-12].

¹ Municipios existentes en Andalucía en 2009.

En líneas generales, estos criterios pueden ser clasificados en tres grandes grupos [13]:

-Criterios de demanda: este grupo incluye todos aquellos factores que influyen en la demanda de VH en una determinada zona. Esta demanda vendrá determinada tanto por el número de habitantes existentes en esa zona como por la predisposición de los mismos a emplear VH. Esta predisposición vendrá influenciada a su vez por las características de esos habitantes (utilización de vehículo, edad, renta, nivel educativo, nivel de concienciación medioambiental, etc.) [14-16]. La consideración de estos criterios lleva a que el grado de penetración de los VH en un municipio no sea, necesaria o únicamente, proporcional a su número de habitantes.

En las fases muy iniciales del despliegue es de esperar que el concepto de idoneidad se asimile al nivel de demanda, de tal forma que las zonas más idóneas para la localización de estaciones de hidrógeno serán aquellas que posean una mayor concentración esperada de primeros usuarios de VH. La razón es que en las fases iniciales del despliegue el número de VH será pequeño y, por tanto, también la demanda de hidrógeno. De este modo, las estaciones de hidrógeno tenderán a localizarse allí donde exista a una mayor demanda y el hidrógeno será producido en las propias estaciones de repostaje.

Sin embargo, la importancia de este grupo de criterios será menor a medida que aumente el grado de penetración de los VH. A medida que el despliegue de las infraestructuras se vaya desarrollando, el objetivo de proporcionar cobertura a todo el territorio, y no solo a las de mayor demanda, irá adquiriendo más importancia.

-Criterios de oferta: este grupo de criterios hace referencia al impacto que puede tener la tecnología empleada para la producción de hidrógeno en la localización de las estaciones de hidrógeno. La tecnología de producción puede condicionar la localización de las estaciones de servicio en una zona en vez de otra. Por ejemplo, en una primera fase, el hidrógeno podría tender a ser producido a partir de gas natural, por ser éste el medio de producción más competitivo y sencillo. En este caso, la ausencia en la zona de una red de gas natural podría llevar a situar las estaciones en una zona con peores valores en otros criterios (por ejemplo, de demanda), dado el alto coste del transporte del hidrógeno al principio. Algo similar ocurre en el caso de la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables. La ausencia de energías renovables en una zona hace que sea necesario el transporte de hidrógeno renovable desde otra, aumentando el coste de

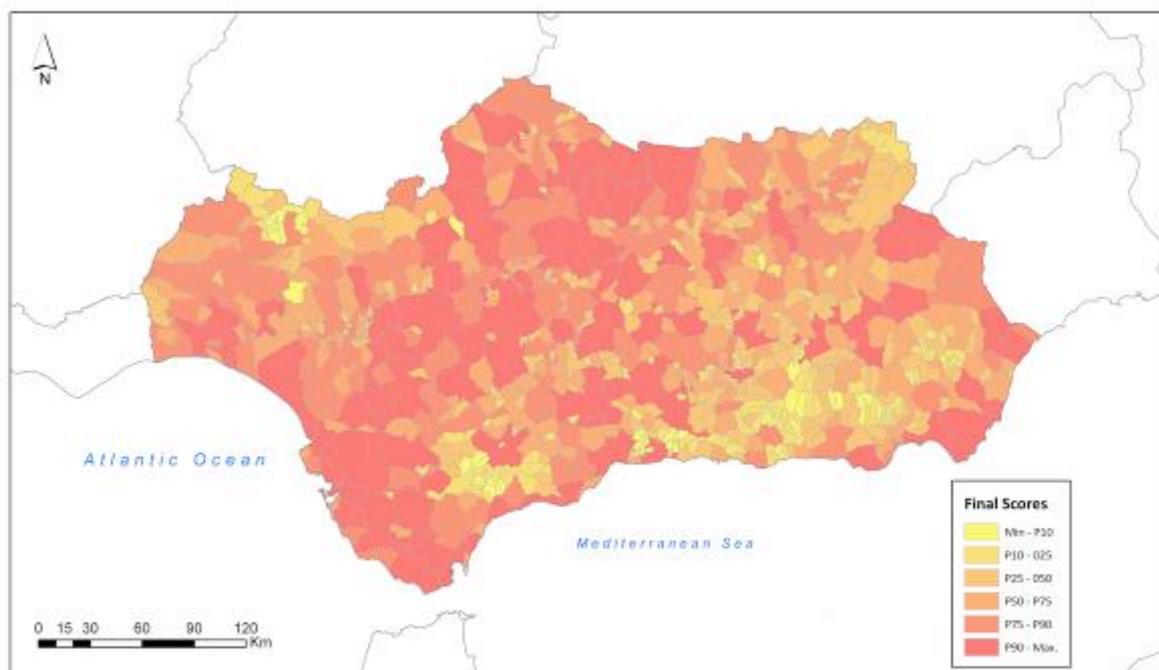
las infraestructuras en las fases iniciales, en el caso de que se persiga el uso de hidrógeno renovable en el transporte. En estos casos, los agentes decisores tendrían que comparar el intercambio entre el coste de transportar el hidrógeno hasta esa zona y la bondad de esa zona atendiendo a los otros criterios. Evidentemente, en fases más avanzadas del proceso de despliegue, la necesidad de dar cobertura a todo el territorio hace que sea necesario planificar un sistema de transporte de hidrógeno a lo largo de todo el territorio.

-Criterios medioambientales. Una de las ventajas de la Economía del Hidrógeno es la disminución de los gases contaminantes derivados del empleo de los combustibles fósiles en el sector transporte. Esta característica del hidrógeno como vector energético puede llevar a que el sector público, como agente participante en el despliegue, valore positivamente (y apoye) la localización de las estaciones de hidrógeno en zonas donde exista un nivel de contaminación demasiado elevado, con la idea de promover en estas áreas el uso de un combustible limpio.

Estos criterios medioambientales podrían ser también incluidos dentro de los criterios de demanda. Un mayor nivel de contaminación en un área puede llevar a que sus habitantes estén más concienciados por los problemas medioambientales y, por ello, a que exista en esa zona una mayor demanda de VH. De forma similar, el apoyo del sector público al despliegue de los VH (por ejemplo, en forma de ayudas a la compra de vehículos) puede llevar a la existencia de una mayor demanda de VH.

En [6], los autores emplearon una aproximación multicriterio para determinar de los municipios más adecuados para el establecimiento de ESH en Andalucía. Los 770 municipios existentes en Andalucía en 2009 fueron caracterizados atendiendo a criterios de demanda (número de vehículos registrados, número de kilómetros de carreteras nacionales y autonómicas, y el valor medio de las rentas declaradas), criterios de oferta (potencial de energías renovables), y criterios medioambientales (niveles de contaminación en toneladas equivalentes de CO₂). Dada la disponibilidad de energías renovables existente en Andalucía y los criterios establecidos en [14] (y posteriormente ratificados en [4]), la existencia de energías renovables en un municipio fue tomada como un factor positivo a la hora de valorar la idoneidad de un municipio para el establecimiento de ESH. Finalmente, a partir de entrevistas con expertos y el empleo de la técnica Proceso Analítico Jerarquizado, estos autores obtuvieron para cada municipio una puntuación reflejando su idoneidad para el establecimiento de ESH (ver Figura 3).

Figura 3. Ordenación de los municipios andaluces según su idoneidad para el establecimiento de ESH.



Fuente: [6]

Esta ordenación refleja un potencial mayor real de algunos municipios frente a otros a la hora de emplear VH, y también a la hora de albergar ESH. Por tanto, es posible considerar que esta lista de municipios es un buen punto de partida para el inicio del despliegue de la infraestructura de hidrógeno.

Los 35 municipios que obtuvieron más puntuación en la ordenación son: Córdoba, Jerez de la Frontera, Sevilla, Málaga, Jaén, Arcos de la Frontera, Écija, Antequera, Carmona, San Roque, Alcalá de Guadaíra, Utrera, Huelva, Osuna, Úbeda, Ronda, Lucena, Baena, Medina-Sidonia, Morón de la Frontera, Andújar, Loja, Hinojosa del Duque, Montoro, Huéscar, Fuente Obejuna, Villanueva de Córdoba, Hornachuelos, Los Barrios, Marchena, Vejer de la Frontera, Marbella, Almería, Priego de Córdoba, y Espiel.

Como puede apreciarse en la Figura 3, los municipios con puntuaciones más altas están bastante agrupados en la zona occidental de Andalucía, constituyendo lo que podría ser una zona inicial preferente para el desarrollo de la infraestructura de hidrógeno para el transporte; esto es, existe un gran grupo de municipios con un alto

nivel de idoneidad para el establecimiento de ESH, suficientemente cercanos y que aglutinan un considerable porcentaje de población.

A continuación, se estudiará el número de ESH a establecer en los municipios andaluces con mayor puntuación, de acuerdo a la ordenación anterior, dado el papel relevante que dichos municipios jugarán en el éxito de la estrategia de despliegue.

3. Análisis del despliegue de estaciones de servicio de hidrógeno en los municipios más relevantes

El análisis anterior ha puesto de manifiesto la existencia en Andalucía de una zona inicial preferente para el despliegue de infraestructuras. En esta zona se encuentran cuatro de los cinco municipios más poblados de Andalucía, que además ocupan los cuatro primeros puestos de la ordenación de municipios comentada anteriormente: Sevilla (702,355 hab.), Málaga (567,433 hab.), Córdoba (328,841 hab.) y Jerez de la Frontera (211,900 hab.) [18]. Este hecho adquiere especial relevancia si se tiene en cuenta que, como se ha mencionado anteriormente, en la fase inicial de despliegue de infraestructuras el concepto de idoneidad se asimilará al concepto de demanda, y éste a su vez puede identificarse al concepto de población. Por tanto, estos cuatro municipios pueden desempeñar un papel muy relevante en la estrategia inicial de despliegue, requiriendo por tanto un análisis pormenorizado.

El objetivo de este análisis es identificar el número mínimo de HRS necesario para proporcionar un nivel de cobertura necesario considerado como aceptable por los potenciales compradores de VH (en comparación con los niveles actuales de cobertura).

Para ello, las actuales gasolineras son tomadas como potenciales localizaciones de ESH. Este hipótesis está en consonancia con diferentes estudios que afirman que la transición a la Economía del Hidrógeno en el sector transporte será realizada inicialmente mediante la instalación de dispensadores de hidrógeno en las gasolineras actuales [19-20].

Este hipótesis tiene en cuenta el hecho de que la actual localización de las estaciones de hidrógeno y su número ha sido el resultado de un largo proceso de desarrollo y ajuste asociado al sistema energético actual basado en combustibles fósiles. Esta hipótesis considera la influencia de diversos factores administrativos, geográficos, y socio-económicos que llevaron a la configuración actual de la red de gasolineras en

los diferentes municipios. De acuerdo con esta hipótesis, cuando la Economía del Hidrógeno alcance su plena madurez, el número y distribución de las estaciones de hidrógeno coincidirá con los actuales, ya que los VH y los de gasolina presentan prestaciones similares. Sin embargo, en las fases iniciales, el problema se limita a establecer el número y localización de un cierto número de ESH de entre las localizaciones actuales de las gasolineras.

Para ello, un criterio es determinar para las fases iniciales el número de estaciones y su localización de forma que proporcionen un cierto nivel de accesibilidad para todo el municipio [21-22].

Este nivel de accesibilidad puede ser medido como la distancia total desde los hogares de los individuos a la ESH más cercana (modelos “p-median”). De este modo se supone implícitamente que los potenciales compradores de vehículos de hidrógeno están repartidos homogéneamente por todo el municipio, aunque podrían introducirse ponderaciones en el modelo para dar más relevancia a aquellas zonas del municipio que concentren individuos con características más afines a las de los potenciales compradores de VH (si estas características fuesen conocidas). Cuanto menor sea la distancia, más alto será el nivel de accesibilidad.

Para la aplicación de este modelo en este documento se divide cada uno de estos municipios en secciones censales, y cada sección censal i se caracteriza atendiendo al número de habitantes p_i residiendo en ella y a su distancia d_{ij} a cada una de las potenciales localizaciones (gasolineras) j . La función objetivo es entonces definida como:

$$\text{Min } f_{\mathbf{1}} = \sum_{i=1}^I p_i \sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

donde x_{ij} es una variable binaria que toma el valor 1 si la estación j suministra a la sección censal i , 0 en caso contrario, I es el número total de secciones censales, y J es el número total de gasolineras existentes en el municipio.

Esta optimización está sujeta a una serie de restricciones. La restricción (2) requiere que la demanda de hidrógeno de cada sección censal i sea asignada a solamente una gasolinera j :

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

La expresión (3) permite que la demanda de hidrógeno de cada sección censal sea asignada a una gasolinera solamente si una ESH ha sido situada allí.

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i, j \quad (3)$$

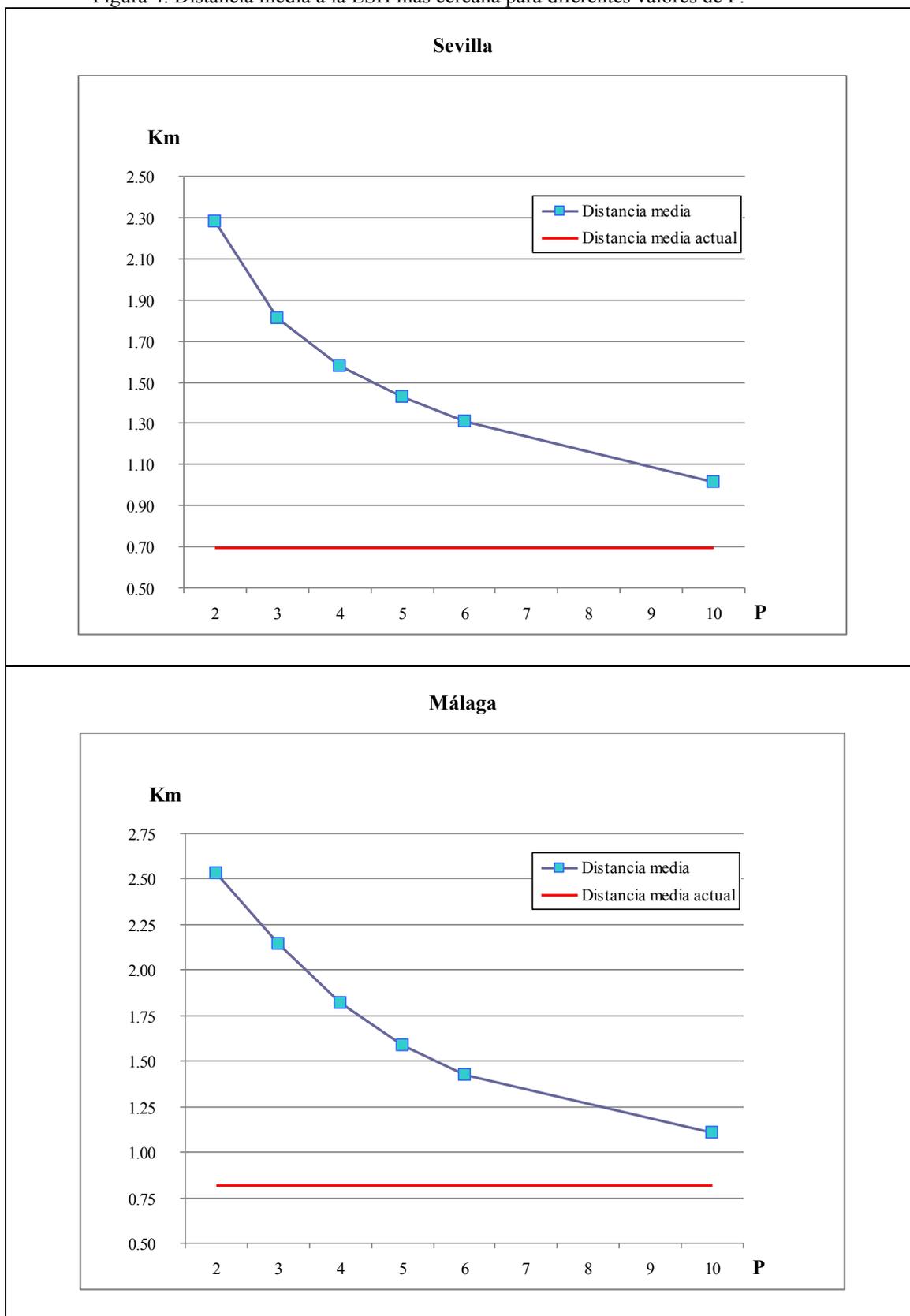
Finalmente, la expresión (3) establece el número total de estaciones de servicio que pueden situarse (representado por P).

$$\sum_{j=1}^J y_j = P \quad (4)$$

La resolución de este modelo proporciona, para cada valor de P , la distancia total existente para todos los habitantes del municipio a la gasolinera más cercana, lo cual puede ser considerado como un indicador de accesibilidad. La división de esta distancia total entre el número de habitantes del municipio proporciona la distancia media por habitante. La comparación entre la distancia media para cada P y la existente para el caso en el que P iguala el número total de gasolineras en el municipio puede ayudar a determinar el número de ESH en cada uno de los cuatro municipios considerados necesario para proporcionar una adecuada cobertura en las diferentes fases del despliegue.

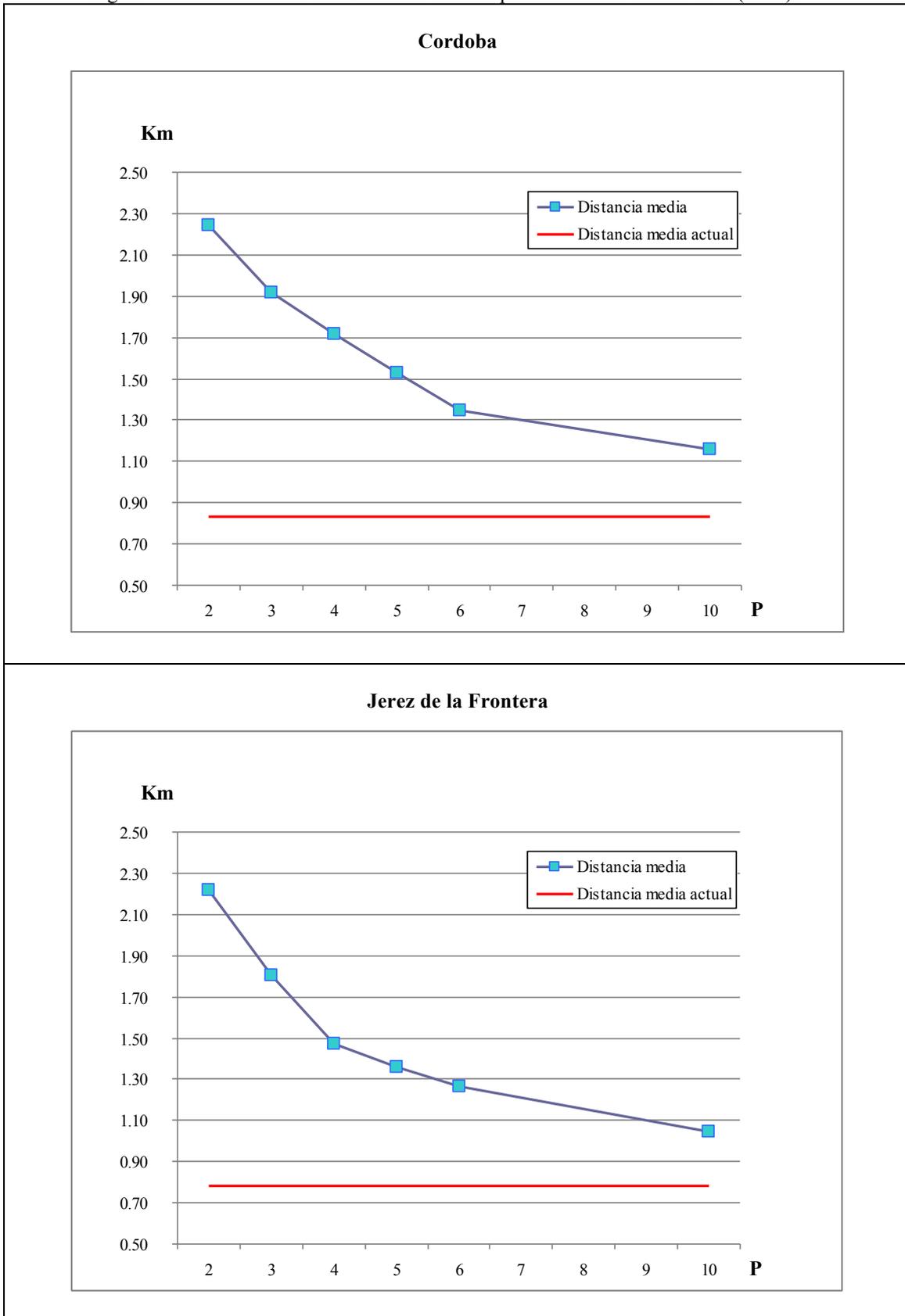
Para la aplicación de estos modelos a los municipios de Sevilla, Málaga, Córdoba y Jerez de la Frontera se han empleado datos provenientes de [23-24]. Los resultados aparecen recogidos en la Figura 4. En el Anexo I se recoge la localización de las gasolineras existentes en estos municipios en el año 2014, así como su división en secciones censales (elaboración propia).

Figura 4. Distancia media a la ESH más cercana para diferentes valores de P.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Distancia media a la ESH más cercana para diferentes valores de P (cont.).



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4, el valor mínimo de P que se ha contemplado es 2, ya que la existencia de una sola ESH produciría una inseguridad demasiado elevada en los potenciales compradores de VH sobre la seguridad en el suministro. La razón es que en caso de existir solamente una ESH si ésta dejara de funcionar por cualquier motivo se encontrarían desabastecidos de suministro.

La Figura 4 muestra que las distancias medias actuales para los cuatro municipios considerados son muy similares (0'7, 0'82, 0'83 y 0'78 para Sevilla, Málaga, Córdoba y Jerez de la Frontera respectivamente). El establecimiento de la distancia mínima que los individuos estarían dispuestos a aceptar requeriría el desarrollo de encuestas. Dada la inexistencia de tales encuestas en Andalucía, en este trabajo se plantea una distancia máxima del doble de la existente actualmente, de forma que se supone que un potencial comprador de VH percibirá como aceptable una disponibilidad del hidrógeno (medida como distancia media a la estación más cercana) que no sea superior al doble de la existente actualmente. Este criterio lleva a establecer en 6, 5, 5 y 4 el número mínimo de ESH requerido en Sevilla, Málaga, Córdoba y Jerez de la Frontera, respectivamente.

4. Análisis del tráfico de las carreteras en Andalucía

Una vez identificados los municipios clave en el despliegue inicial de las infraestructuras de hidrógeno, el siguiente paso consiste en interconectar esos municipios. Para ello es necesario determinar las principales vías de comunicación entre dichos municipios. El Anexo 2 muestra el mapa de carreteras de España así como las intensidades medias diarias (medidas como vehículos/día) en las carreteras de España en el año 2013 [25].

Dicho Anexo muestra que no existe duda a la hora de seleccionar las principales carreteras que unen los cuatro municipios. Las principales vías son la N-IV (Sevilla-Córdoba), la AP-4 o la N-IV (Sevilla-Jerez de la Frontera), la A-381 junto con la A-7 y/o la AP-7 (Jerez de la Frontera-Málaga), la A-45 (Córdoba-Málaga), y la A-92 (Sevilla-Antequera como parte de la ruta hacia Málaga).

5. Propuesta de estrategia de despliegue

La estrategia de despliegue inicial de las ESH propuesta en este documento se divide en tres fases:

A. Fase inicial.

En esta fase se inicia el despliegue de ESH en los cuatro municipios identificados como muy relevantes en la estrategia de despliegue: Sevilla (6 estaciones), Córdoba (5 estaciones), Málaga (5 estaciones) y Jerez de la Frontera (4 estaciones) (representados mediante puntos azules en la Figura 5).

B. Fase de consolidación.

En esta fase se procede a la interconexión de los cuatro municipios anteriores. Para ello se definen municipios de interconexión que contarán solamente con una sola ESH. Aunque la autonomía de los VH existentes actualmente permite realizar los desplazamientos entre los municipios de la “Fase inicial” sin tener que repostar, el objetivo de estos nodos de interconexión es mejorar la percepción en la disponibilidad del combustible en los conductores.

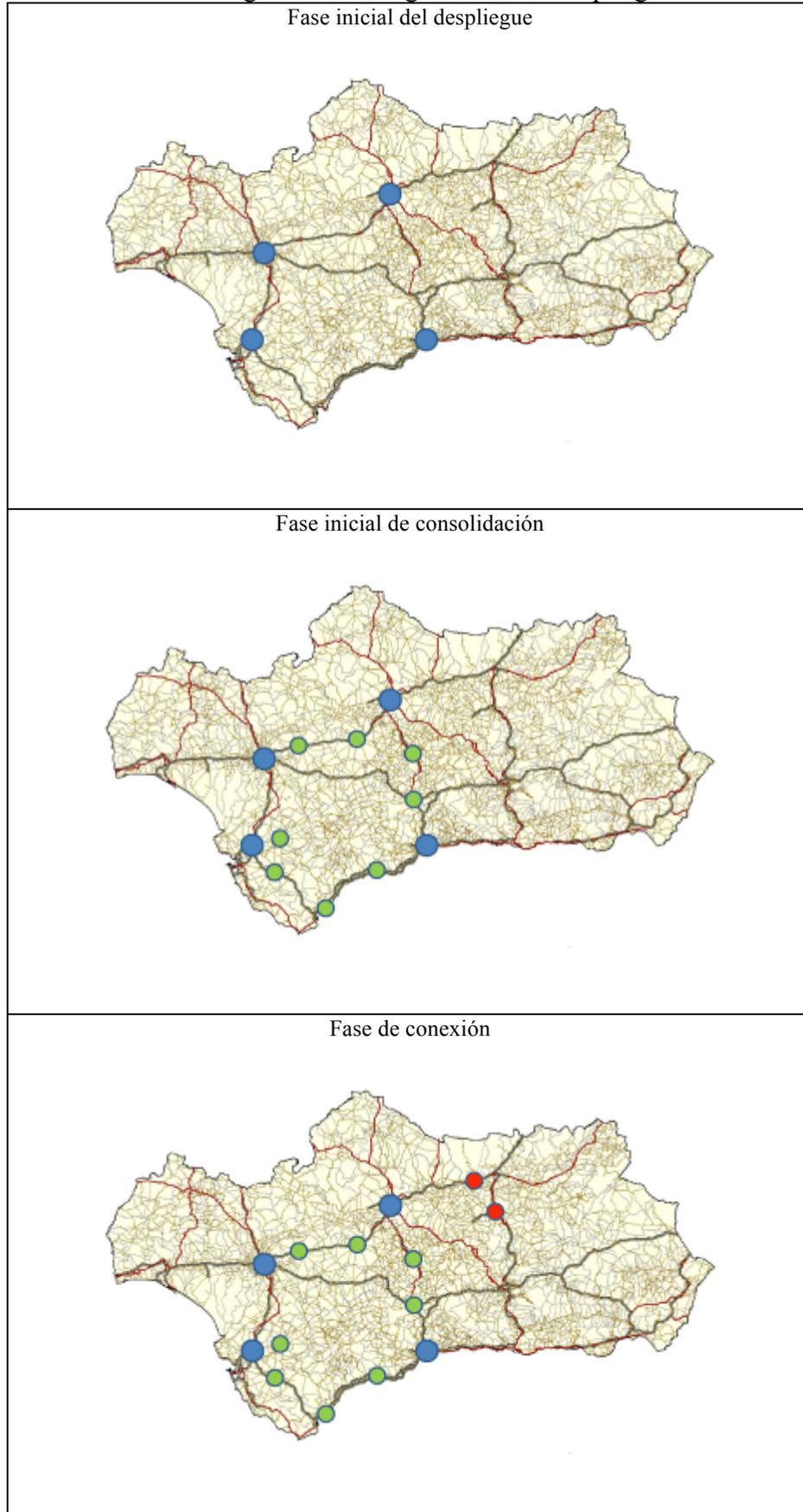
Para la identificación de estos nodos de interconexión se ha tenido en cuenta las principales carreteras de comunicación comentadas anteriormente y la idoneidad de los municipios para el establecimiento de ESH de acuerdo a la ordenación recogida en el apartado 3.

En esta fase se establecerían ESH en Arcos de la Frontera, Écija, Antequera, Carmona, San Roque, Lucena, Medina-Sidonia y Marbella, totalizando 8 ESH (representados mediante puntos verdes en la Figura 6).

C. Fase de conexión.

En esta fase se conecta la zona inicial preferente con el resto de España estableciendo dos nuevos municipios de interconexión en Andújar y Jaén (puntos rojos en la Figura 7).

Figura 5. Estrategia inicial de despliegue.



Fuente: Elaboración propia.

6. Análisis de costes y medioambiental

Análisis de costes.

Para la Fase Inicial de despliegue se plantea el uso de ESH dispensadoras de hidrógeno comprimido a 700 bar con almacenamiento y 2 surtidores (ESH tipo I), las cuales serán abastecidas en cada municipio mediante una planta de producción de hidrógeno de 7,000 kg/día. En este caso, al existir entre 4 y 6 ESH en estos municipios según el municipio, puede emplearse en cada municipio una producción del hidrógeno centralizada que es distribuida entre las diferentes ESH de cada municipio.

Según reuniones mantenidas con expertos, el coste de cada una de estas ESH alcanzaría los 1'5 millones de euros, mientras que el coste de cada planta se situaría alrededor de los 14 millones de euros.

En las otras dos fases (Fase de Consolidación y Fase de Conexión) para los nodos intermedios se emplearían ESH, con dispensado de hidrógeno a 700 bar producido “in situ”, con capacidad de 1,000 kg/día y 4 surtidores (ESH tipo II). En este caso, a diferencia del caso anterior, no se plantea una producción centralizada ya que solamente se establece una ESH en cada municipio. El coste de esta ESH según expertos consulados rondaría los 4 millones de euros.

Por tanto, el importe total de la inversión correspondiente a esta estrategia de despliegue se situaría alrededor de los 126 millones de euros (20ESH tipo I x 1'5mill. € + 4 plantas prod. H₂ x 14mill. € + 10 ESH tipo II x 4 mill. € = 126 mill. €).

Análisis de los beneficios medioambientales en términos de contaminación evitada de CO₂.

El cálculo de las emisiones de CO₂ evitadas por este despliegue inicial de las ESH se desglosa en los siguientes pasos:

- Capacidad diaria de producción de hidrógeno en Andalucía.

$$7,000 \text{ (kg H}_2\text{/día)} \times 4 \text{ plantas} + 1,000 \text{ (kg H}_2\text{/día)} \times 10 \text{ ESH tipo II} = 38,000 \text{ (kg/día)}.$$

- Número de VH que se pueden abastecer de hidrógeno al día.

Tomando como referencia el Toyota FCV Mirai [26], la capacidad del depósito de un VH es 5 kg. Por tanto, el número máximo de VH que se pueden abastecer al día es:

$$38,000 \text{ (kg/día)} / 5 \text{ (kg/VH)} = 7,600 \text{ (VH/día)}.$$

- Número de suministros al año por VH

Suponiendo una distancia media recorrida al año de 15,000 km/año y tomando como referencia la autonomía del Toyota FCV Mirai (500km), el número de veces que el VH tendría que repostar al año es:

$$15,000 \text{ (km/año)} / 500 \text{ (km/repostaje)} = 30 \text{ (repostaje/año)}.$$

- Número de días que transcurren entre los suministros al año.

$$365 \text{ días} / 30 = 12'2 \text{ días (12 aprox.)}.$$

- Número de VH que se pueden abastecer como máximo al año con las 30 EHS del despliegue inicial propuesto

$$7,600 \text{ (VH/día)} \times 12 \text{ días} = 91,200 \text{ VH}.$$

- Contaminación de CO₂ que se puede evitar como consecuencia del despliegue inicial de ESH.

Empleando como referencia el Toyota Avensis, similar en categoría al Toyota FCV Mirai, se tiene unas emisiones de CO₂ de 165 gr/km. Por tanto, la contaminación de CO₂ por vehículo al año es de:

$$165 \text{ (gr CO}_2\text{/km)} \times 15000 \text{ (km/año)} = 2'5 \text{ tn CO}_2\text{/año}.$$

Por tanto, la máxima contaminación total evitada de CO₂ que se puede producir como consecuencia de este despliegue inicial de ESH es:

$$91,200 \text{ VH} \times 2'5 \text{ tn CO}_2\text{/año} = 228,000 \text{ tn CO}_2.$$

7. Conclusiones

El estudio realizado muestra que la zona occidental de Andalucía constituye una zona inicial preferente para el desarrollo de las infraestructuras de hidrógeno. En esa zona, existe un gran grupo de municipios con un alto nivel de idoneidad para el establecimiento de ESH, suficientemente cercanos y que aglutinan un considerable porcentaje de población. Sevilla, Málaga, Córdoba y Jerez de la Frontera se manifiestan como clave en esta estrategia de despliegue, ya que han resultado ser los municipios más idóneos para el establecimiento de las ESH.

Un análisis pormenorizado de esos municipios ha establecido en 6, 5, 5 y 4 el número mínimo de ESH requerido en Sevilla, Málaga, Córdoba y Jerez de la Frontera, respectivamente.

En fases posteriores del despliegue se establecerían diez ESH más con el objeto de mejorar la percepción de la disponibilidad del combustible para los potenciales conductores en sus desplazamientos entre esos municipios y con el resto de España. Estos municipios serían: Arcos de la Frontera, Écija, Antequera, Carmona. San Roque, Lucena, Medina-Sidonia, Marbella, Andújar y Jaén.

Para los nodos principales se propone establecer ESH dispensadoras de hidrógeno comprimido a 700 bar con almacenamiento y 2 surtidores, las cuales serán abastecidas en cada municipio mediante una planta de producción de hidrógeno con capacidad de 7,000 kg/día. En el caso de los municipios de interconexión se emplearía en cada uno una ESH dispensado a 700 bar producido “in situ” con capacidad de 1,000 kg/día y 4 surtidores. El coste total de toda esta infraestructura se sitúa en torno a los 126 millones de euros.

En lo que respecta a las beneficios medioambientales, el despliegue inicial de infraestructura propuesto evitaría 228,000 toneladas de CO₂ al año.

8. Bibliografía

[1] Winter C-J. The hydrogen energy economy: an address to the World Economic Forum 2004. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29, 11, 1095-1097, 2004.

[2] Winter C-J. Into the hydrogen energy economy-milestones. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 7, 681-685, 2005.

[3] Agencia Andaluza de la Energía. Datos energéticos de Andalucía 2012, 2013.

[4] Agencia Andaluza de la Energía. Documento Borrador Estrategia Energética de Andalucía 2014-2020, julio 2014.

[5] Daimler, Ford, GM/Opel, Honda, Hyundai/KIA, the Alliance Renault/Nissan, y Toyota. Letter of understanding on the development and market introduction of fuel cell vehicles, 2009.

[6] Directiva 2014/94/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de octubre de 2014, relativa a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos.

[7] National Organization Hydrogen and Fuel Cell Technology. H2 Mobility initiative: Leading industrial companies agree on an action plan for the construction of a hydrogen refueling network in Germany, 30 de septiembre de 2013, www.now-gmbh.de, fecha de acceso diciembre de 2014.

[8] Stewart A. Lessons learned from H2 demonstrations and H2Mobility programmes, presentación realizada en el Workshop Rolling out hydrogen infrastructure for transportation: from scratch to reality 13 de marzo de 2014, Sevilla

[9] Brey J, Carazo AF, Brey R. Using AHP and binary integer programming to optimize the initial distribution of hydrogen infrastructures in Andalusia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 6, 5372–5384, 2012.

[10] Melendez M, Milbrandt A. Regional consumer hydrogen demand and optimal hydrogen refueling station siting. Technical report NREL/TP-540-42224. US Department of Energy; 2008.

[11] HyWays. The European hydrogen energy roadmap. Consortium HyWays; 2008.

[12] HyRREG. The roadmap for hydrogen and fuel cells in SUDOE area. Consortium HyRREG, 2011.

[13] Brey JJ, Brey R, Contreras I, Carazo AF. Roll-out of hydrogen fueling stations in Spain through a procedure based on data envelopment analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 8, 4116–4122, 2014.

[14] Melendez M, Milbrandt A. Regional consumer hydrogen demand and optimal hydrogen refueling station siting. Technical report NREL/TP-540-42224. US Department of Energy, 2008.

[15] Schulte I, Hart D, van der Vorst R. Issues affecting the acceptance of hydrogen fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29, 677-85, 2004.

[16] Kang MJ, Park H. Impact of experience on government policy toward acceptance of hydrogen fuel cell vehicles in Korea. *Energy Policy*, 39, 6, 3465-75, 2011.

[17] Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa. Plan Andaluz de Sostenibilidad Energética 2007-2013 (PASENER). Junta de Andalucía, 2008.

[18] Área de Estudios y Análisis Económico de “la Caixa”, Anuario Económico de España, 2013.

[19] Tollefson, J, Fuel of the future? *Nature*, 464, 1262-1264, 2010.

[20] Stephens-Romero SD, Brown TM, Carreras-Sospedra M, Kang JE, Brouwer J, Dabdub D, Recker WW, Scott Samuelsen G. Projecting full build-out environmental impacts and roll-out strategies associated with viable hydrogen fueling infrastructure strategies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 14309-323, 2011.

[21] Goodchild MF, Noronha V. Location–Allocation and impulsive shopping in the case of gasoline retailing. *Spatial Analysis and Location–Allocation Models*. Van Nostrand Reinhold, New York. 121-136, 1987.

[22] Hodgson MJ, Rosing KE. A network location-allocation model trading off flow capturing and p-median objectives. *Annals of Operations Research*, 40, 247-260, 1992.

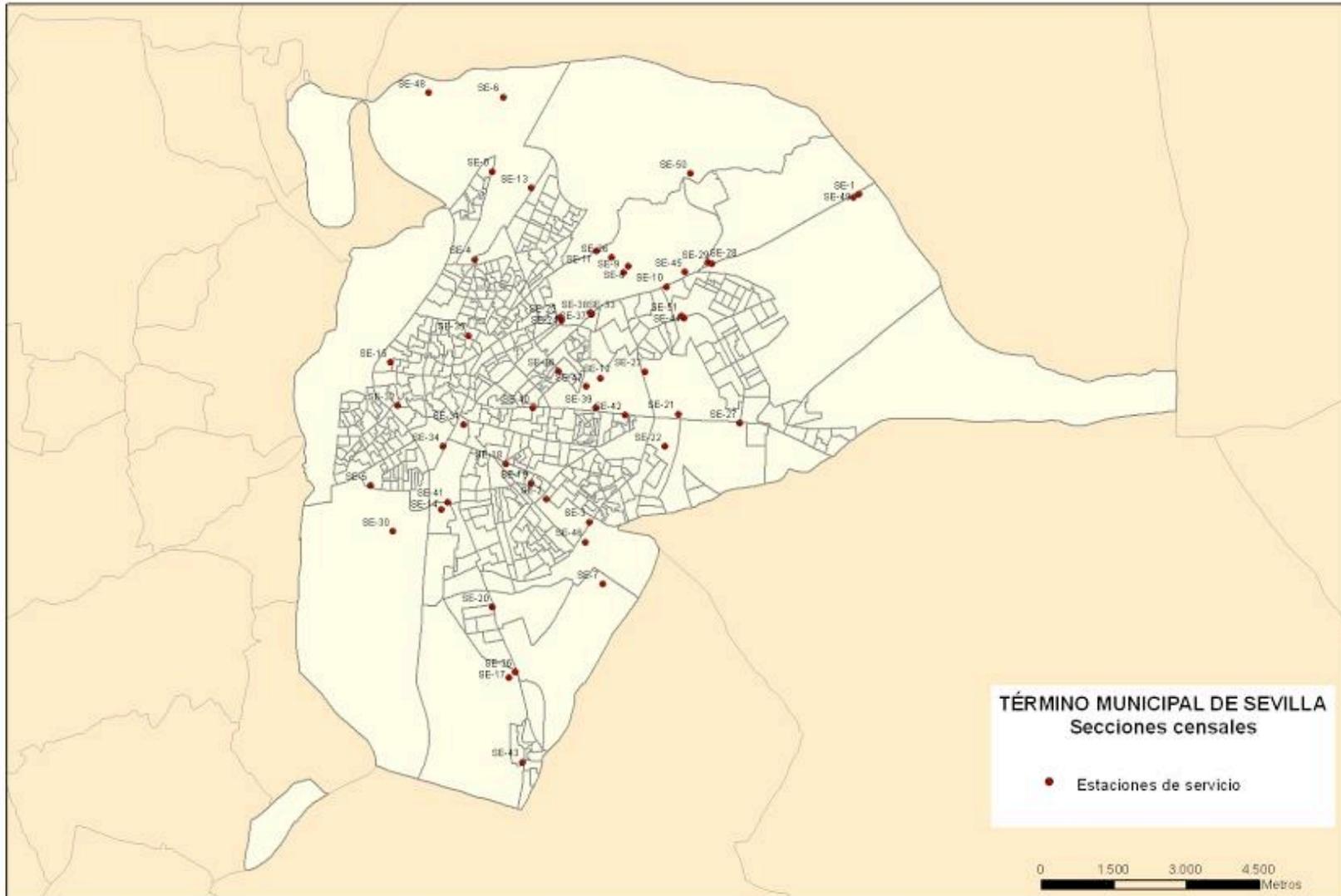
[23] Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. Datos espaciales de referencia de Andalucía: Divisiones administrativas (g17), <http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/g17.htm>, fecha de acceso noviembre de 2014.

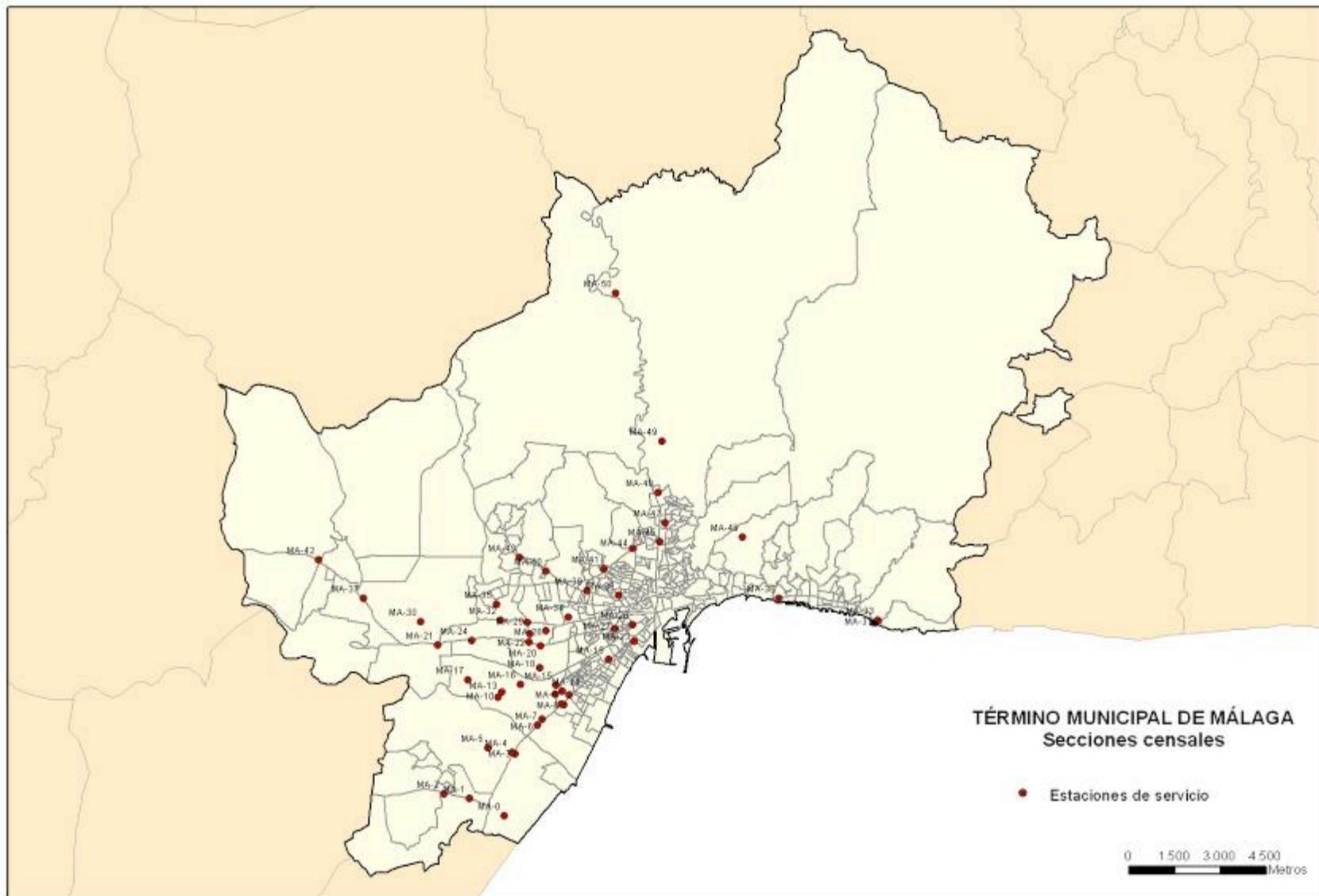
[24] Instituto Geográfico Nacional (Ministerio de Industria, Energía y Turismo). Localización de estaciones de servicio, <http://geoportalgasolineras.es/>, fecha de acceso noviembre de 2014.

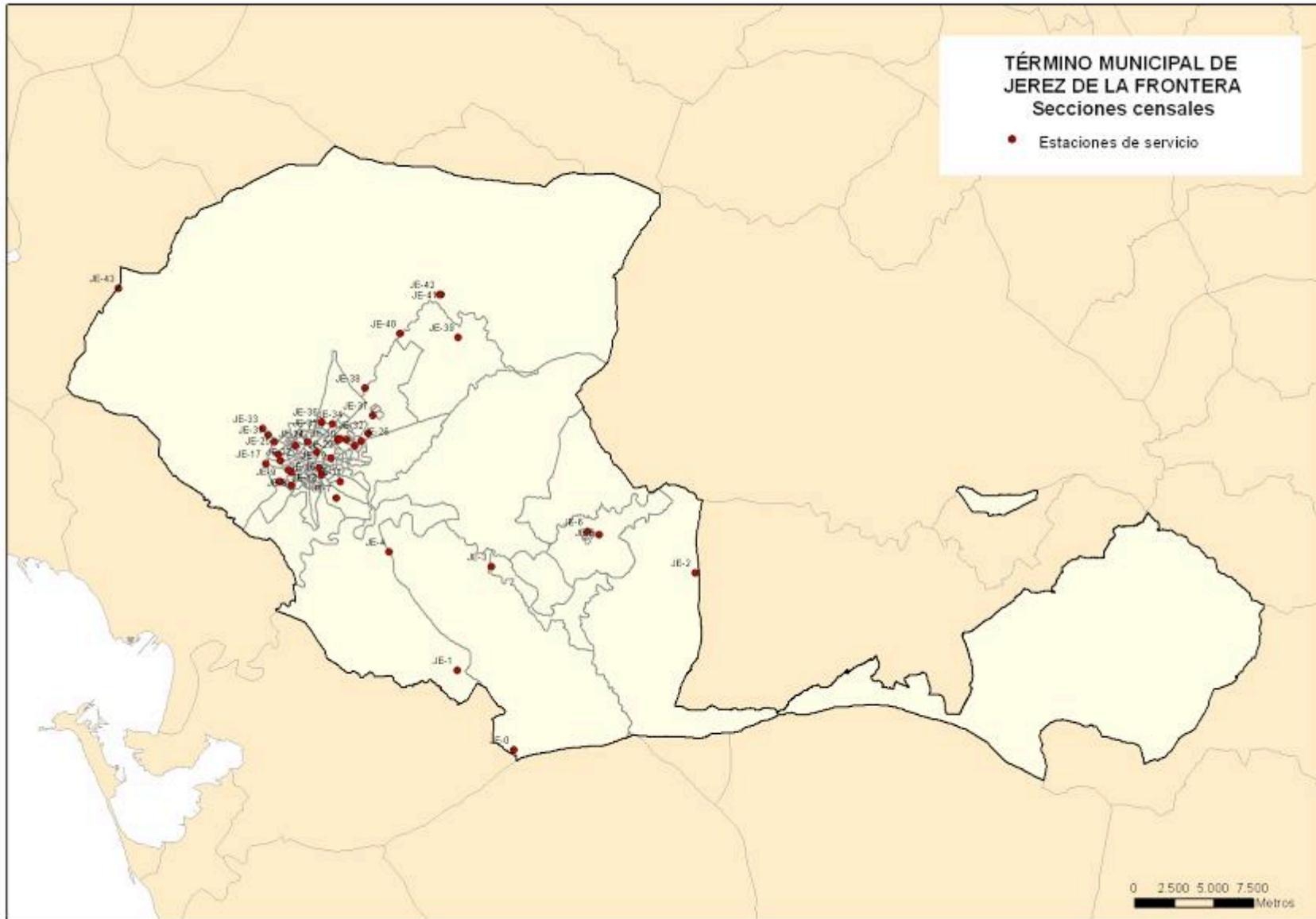
[25] Ministerio de fomento. Mapa de Tráfico Nacional 2013, <http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/2A0C3477-D8AB-407F-BC14-AB4FCB3D351A/126295/MapaIntensidad2013.pdf>, fecha de acceso noviembre de 2014.

[26] <http://www.toyota.com/fuelcell/fcv.html>, fecha de acceso noviembre de 2014.

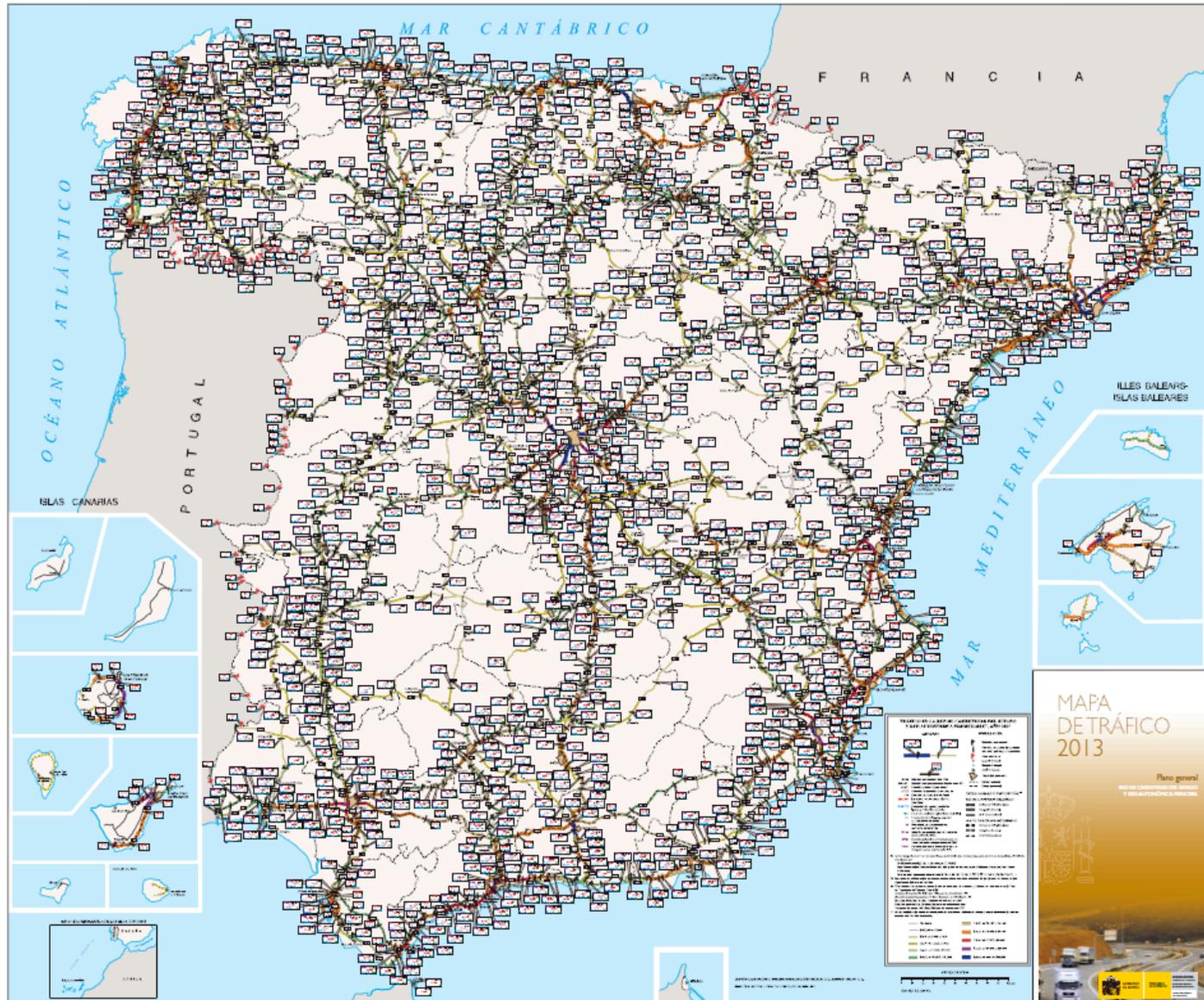
ANEXO I







ANEXO II





Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía IDEA
CONSEJERÍA DE EMPLEO, EMPRESA Y COMERCIO



Unión Europea

Fondo Europeo
de Desarrollo Regional

www.agenciaidea.es

