



## Evaluación de la sostenibilidad de la localización de puertos secos españoles mediante el uso de Redes Bayesianas y Sistemas de Información Geográfica

**Autor:** Samir Awad Núñez

**Institución:** Universidad Politécnica de Madrid

**Otros autores:** Francisco Soler-Flores (Universidad Politécnica de Madrid); Nicoletta González Cancelas (Universidad Politécnica de Madrid); Alberto Camarero Orive (Universidad Politécnica de Madrid)

## RESUMEN

Los puertos secos se conciben como solución a la situación de creciente congestión de las rutas y escasez de espacios libres en las instalaciones marítimas, así como para reducir el importante impacto medioambiental de los puertos marítimos. Además, los puertos secos se presentan también como una oportunidad para fortalecer las soluciones intermodales como parte de una cadena integrada de transporte más sostenible. Sin embargo, su inclusión en el territorio conlleva también algunos impactos tanto en el medio natural como en el medio urbano. El objetivo de esta investigación es evaluar la sostenibilidad de las localizaciones de los actuales puertos secos mediante una metodología basada en el uso de Redes Bayesianas y Sistemas de Información Geográfica. Con los pesos del cuestionario DELPHI, los datos extraídos de la red y la información geográfica de cada variable, se analiza la sostenibilidad de cada ubicación utilizando un Método de Transparencias de Mc Harg.

**Palabras claves:** puertos secos, sostenibilidad, DELPHI, Redes Bayesianas, Sistemas de Información Geográfica.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las sociedades modernas, la necesidad de transporte ha ido creciendo a medida que aumentaba su grado de desarrollo, siendo necesario un aumento del volumen de transporte de bienes para satisfacer la demanda de las personas y las empresas (Camarero y González, 2005). Por otra parte, la estructura económica mundial, con centros de producción y consumo descentralizados, trae consigo un aumento de los flujos de carga y de las distancias de transporte de las mercancías complicando enormemente el transporte. Además, las nuevas tendencias del sector del transporte para reducir los stocks, han llevado a envíos más pequeños pero más frecuentes (Rodríguez, 2006), por lo que se vienen produciendo una serie de problemas en torno al transporte global.

El transporte marítimo se ha convertido en el modo más indicado y más barato para atender las necesidades que se generan de movilidad de las mercancías a grandes distancias. De este modo, los puertos marítimos se configuran como nodos con una importancia capital dentro de las cadenas logísticas como punto de enlace entre dos sistemas de transporte, el marítimo y el terrestre (Hesse y Rodríguez, 2006; Rodríguez, 2006). Sin embargo, como consecuencia de la complejidad del sector del transporte y del aumento del volumen de mercancías transportado, se ha llegado a una situación de creciente congestión de las rutas, de escasez de espacios libres en las instalaciones marítimas y un importante impacto medioambiental sobre la costa (Pons, 2008; Comisión Europea, 2000, 2001; Mc Calla, 2007; Roso, Woxenius y Lumsden, 2009).

Los puertos secos nacen precisamente como solución a estos problemas, al trasladar gran parte de las operaciones al interior del territorio y presentan además una serie de ventajas que se desarrollan en los siguientes subapartados y que están fuertemente alineadas con las políticas prioritarias de la Unión Europea en materia de logística.

### 1.1. ¿Qué son los puertos secos?

La primera mención de los puertos secos en revistas especializadas relacionados con el transporte se documenta en 1980 (Munford, 1980), mientras que en revistas científicas se remonta a 1986 (Hanappe, 1986). Sin embargo no fue hasta 20 años después cuando se

recuperó el interés por el tema para dar solución a los problemas derivados de la creciente congestión de las rutas, la escasez de espacios libres en las instalaciones marítimas (estos dos problemas suponen, en definitiva, un aumento de los costes y un freno a la actividad económica regional) y el importante impacto medio ambiental de los puertos marítimos (Comisión Europea, 2000, 2001).

Según la UN ECE (1998), la definición de Puerto Seco es la siguiente: *“instalación no costera de uso público, distinta de un Puerto y de un Aeropuerto, aprobada por un organismo competente, equipada con instalaciones fijas y ofreciendo servicios para manipular y almacenar temporalmente cualquier clase de mercancías incluyendo contenedores – que sea considerada como “en tránsito” para efectos de aduanas, por cualquier modo de transporte de superficie no costero, y que tiene además la capacidad de efectuar controles aduaneros que permitan a estas mercancías continuar su tránsito, terminar el viaje y ser utilizadas localmente, ser despachadas para exportación, o ser re-exportadas según sea el caso”*.

Para Camarero (2005) resulta fundamental el hecho de que la conexión entre el puerto marítimo (o puertos) y el puerto seco se produzca a través de la red ferroviaria. Así, los puertos secos pueden ser considerados como una prolongación de los puertos marítimos, mejorando el acceso a los mismos y garantizando que tengan un mayor hinterland como consecuencia del aumento en la accesibilidad que producen

Fundiendo estos conceptos e incluyendo el concepto de comodidad (entendiendo ésta como la utilización del medio de transporte más sostenible y más adecuado en cada eslabón de la cadena logística. Roso, Woxenius y Lumsden, 2009), podemos concluir que los puertos secos son terminales intermodales situadas en el interior del territorio, conectadas por ferrocarril con una o varias terminales marítimas y con la capacidad de posponer el control aduanero a la entrada en el puerto seco.

## **1.2. La importancia de los puertos secos**

Los puertos marítimos compiten para: fidelizar sus tráficos, captar nuevos tráficos y formar parte de nuevas cadenas de suministro, para, a su vez, crecer en tráfico y generar más valor añadido.

Los puertos secos suponen una ventaja competitiva para los puertos marítimos. Esto se refleja en los siguientes aspectos:

- Agilizan el tránsito de la mercancía a través de los puertos marítimos al permitir el despacho de aduanas y otras actividades complementarias fuera de sus instalaciones, como las actividades de outsourcing o la limpieza y reparación de contenedores, descongestionando de este modo sus operaciones.
- Amplían el hinterland de los puertos marítimos (región del territorio en que un puerto tiene ventajas notables en el acceso terrestre, por lo que puede asimilarse a su zona de influencia en el territorio). Los puertos secos pueden ser considerados, por tanto, como una prolongación de los puertos marítimos. Además, la expansión del hinterland provoca un gran desarrollo en las zonas contenidas en el área de influencia que se sitúan cerca centros de producción y consumo, convirtiendo la ubicación de los puertos secos en un tema clave cuando se considera la generación de una estrategia de colaboración-competencia para el

sistema logístico de un país o región. Con esta ampliación del hinterland se producen algunos efectos muy importantes da cara a incrementar la competitividad de los puertos marítimos: 1) se facilita la aproximación del puerto de mar al cliente final (aproximación física y comercial orientación al cliente), 2) se refuerza el papel del puerto de mar en las cadenas de suministro (presencia física y comercial a los cargadores, importadores, exportadores; el puerto se acerca al mercado), y 3) se aumenta la presencia en los nodos relevantes de las cadenas de suministro (Estrada, 2011).

- Permiten economías de escala, de modo que el coste unitario de la distribución de la mercancía a través del Puerto Seco resulta más económico que el servicio directo desde el puerto marítimo.

Además, la mercancía que se mueve en los puertos secos suele estar contenerizada, si bien cualquier mercancía es susceptible de ser transbordada en estas instalaciones. Esta característica de la mercancía supone una ventaja para que el ferrocarril sea el medio de transporte preferente en estas instalaciones (Ballis, 2002; Kozan, 2000) mejorando, como veremos en los siguientes apartados, la sostenibilidad de la cadena logística. La construcción de puertos secos se convierte así en un catalizador del aumento de la participación del transporte ferroviario en el conjunto del transporte de mercancías, algo que como sabemos, se persigue en España desde hace tiempo (Ministerio de Fomento, 2013).

### **1.3. Los puertos secos como impulsores de una cadena logística más sostenible**

Gracias a la implantación de puertos secos es posible discretizar cada uno de los eslabones de la cadena de transporte, permitiendo que los modos más contaminantes y con menor capacidad de transporte tengan itinerarios lo más cortos posible, o bien, sean utilizados únicamente para el transporte de mercancías de alto valor añadido (Roso, 2008). Así, los puertos secos se presentan como una oportunidad para fortalecer las soluciones intermodales como parte de una cadena integrada de transporte sostenible, potenciando el transporte de mercancías por ferrocarril (McCalla, 2007; Comisión Europea, 2001 y 2010).

Según Vassallo et al. (2014) y van Essen et al. (2011), si evaluamos la intensidad energética y de emisiones de CO<sub>2</sub> para diferentes modos de transporte de mercancías, podemos apreciar que el modo de transporte terrestre de mercancías menos contaminante y con menores externalidades es el ferrocarril. Por eso, los puertos secos, al conectar los puertos marítimos con los centros de producción y consumo por medio del ferrocarril, suponen una oportunidad para mejorar la sostenibilidad de la cadena logística. Teniendo en cuenta la cuota de participación actual de la carretera y el ferrocarril en el transporte terrestre en España, que es respectivamente del 95,5% a favor de la primera y de 4,5% a favor del segundo, podemos comprobar con facilidad que una participación mayor del ferrocarril se traduce en una cifra menor de los costes externos (ver Figura 1).

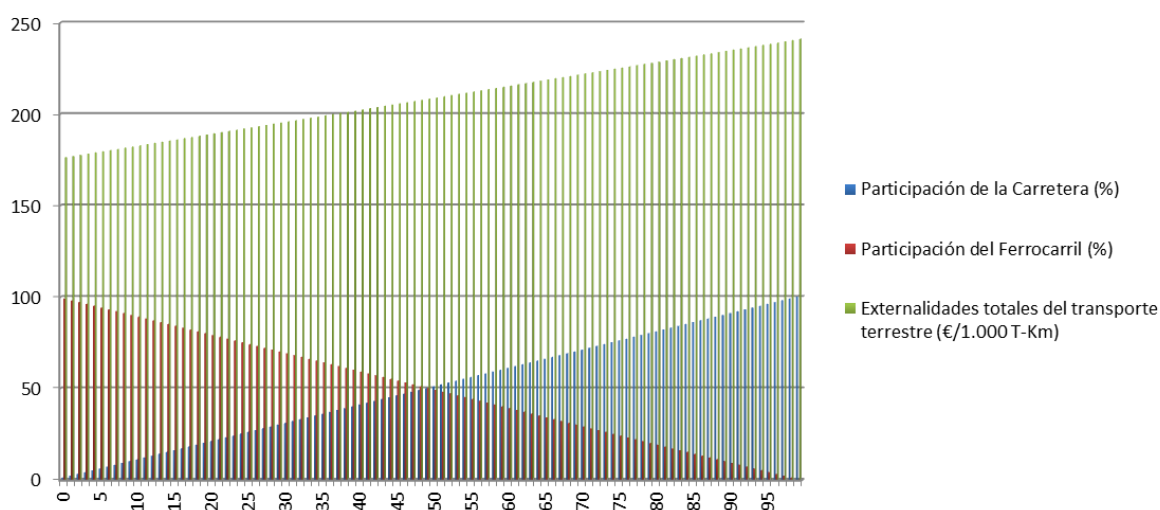


Figura 1. Externalidades del transporte en función de la participación del ferrocarril y la carretera en el reparto modal del transporte terrestre de mercancías. Fuente: elaboración propia a partir de datos de van Essen et al. (2011).

Por ejemplo, si pensamos en que la cuota de participación total del ferrocarril pudiera aumentarse hasta el 10%, pasaríamos de los actuales 238 €/1.000 T-Km a 234,40 €/T-Km. El último dato publicado por el Ministerio de Fomento sobre el tráfico interior de mercancías por modos terrestres, del año 2012, indica que en ese año se movieron un total de 288.467 millones de T-Km, suponiendo un coste externo total de 68.655.146.000 €. Con una participación del ferrocarril del 10%, esta cifra se rebajaría hasta los 67.617.738.790 €. Es decir, se ahorrarían anualmente 1.037.407.210 € en externalidades.

La competencia de los distintos modos de transporte y la diferencia en los intereses de las distintas partes interesadas han llevado a una situación de desorden en la distribución de las plataformas logísticas que refleja la necesidad de un árbitro en la planificación de la localización de estas instalaciones y una apuesta decidida por el transporte ferroviario de mercancías, incluso con infraestructura separada respecto al transporte de pasajeros (Hesse y Rodrigue, 2004). Una vez realizada la ruptura de carga en las instalaciones de los puertos secos, la mercancía se moverá en camión para un transporte de proximidad, pero se habrá reducido la distancia a realizar en este modo que, como hemos visto, resulta más contaminante.

## 2. PAUTAS DE LOCALIZACIÓN INDUSTRIAL PARA PUERTOS SECOS

La determinación de la ubicación más adecuada para situar diversos tipos de instalaciones es un importante problema geográfico, con significativas repercusiones económicas, sociales y ambientales.

La diversidad de los factores que intervienen en la localización de una industria ha movido a buen número de economistas a lo largo del último siglo a construir teorías y modelos, que intentan explicar la complejidad del mundo real mediante necesarias simplificaciones del mismo, tomando unos factores como constantes y otros como variable.

## 2.1. Repaso histórico a los modelos de localización industrial

Se resumen a continuación los principales hitos de la Teoría de la Localización Industrial (Figura 2).

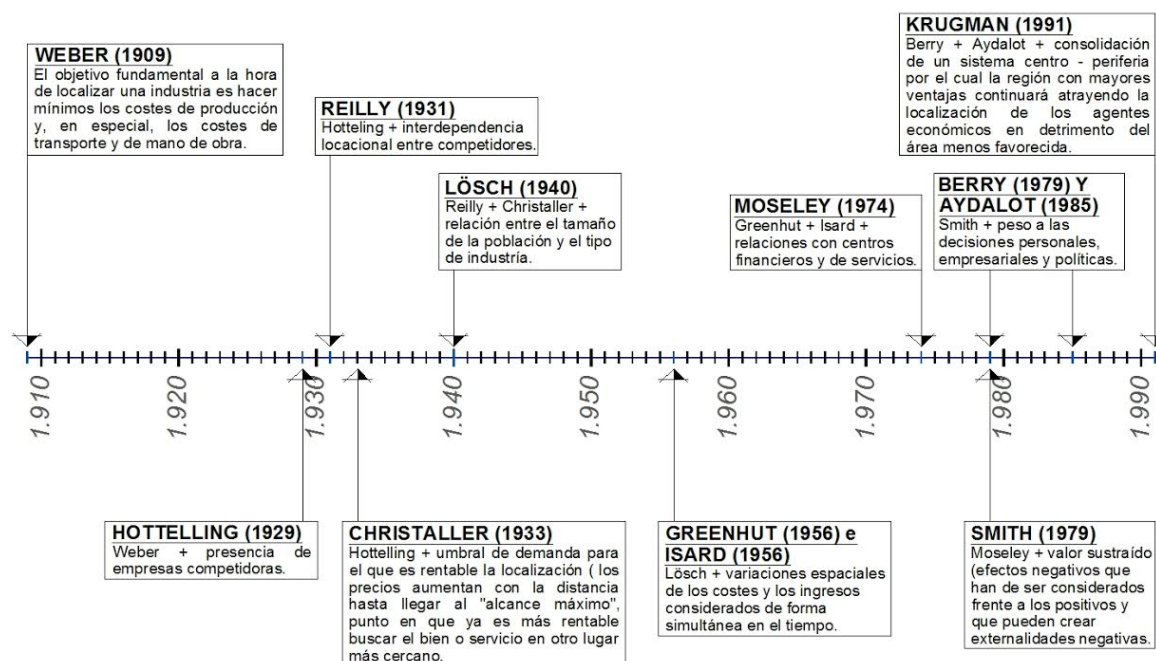


Figura 2. Línea del tiempo de los principales avances en la planificación de la localización industrial.

Como vemos, el enfoque no puede ser puramente económico sino que deben tenerse en cuenta de forma conjunta las implicaciones en los niveles de crecimiento económico, de bienestar social y de aceptabilidad medioambiental, ya que cualquier instalación industrial cambia las condiciones del entorno y, por ello, no debería hablarse de puntos óptimos sino más bien de satisfactorios.

A pesar de que algunas veces la gran ciudad no sea el emplazamiento perfecto, no cabe duda que ésta tiene un alto valor locacional, siendo las ciudades las que tienen un mayor volumen de empleo, de producción, de creación de nuevas empresas; así como un sistema de producción más diversificado y de mayor calidad (Sobrino, 2001; Hormigo, 2011; Pons, 2008).

Por otro lado, las pautas de localización de las instalaciones industriales existentes ponen de manifiesto la existencia de un conjunto de fuerzas centrífugas que desplazan las nuevas factorías hacia municipios de menor tamaño que forman parte de la metrópoli urbana (Costa, Segarra y Viladecans, 2000). Esto se debe en gran medida a que las grandes ciudades son los lugares de más atracción y, por ello, donde el precio del suelo y los procesos de competencia por su uso son más importantes. Según Brown (2005), existe la necesidad de lograr una situación que posea la mayor accesibilidad posible hacia y desde los centros de origen y destino de los diversos flujos, lo que se consigue por medio de la conexión con los sistemas de transporte y comunicación.

Sin embargo, el transporte no garantiza el desarrollo de las regiones si no se planifican las infraestructuras adecuadas, y sin los medios de transporte acordes con las mercancías a movilizar, que podrían limitar el desarrollo (Schweitzer, 2011). Las infraestructuras establecen potencialidades territoriales derivadas de la accesibilidad, conexión e interrelación, capaces de crear una serie de ventajas comparativas territoriales (Gómez y Delgado, 1998). Por eso, las industrias están localizadas generalmente junto a los ejes de transporte, pues por lo común, una mayor distancia supone mayores costes y menores contactos.

También hay que tener en cuenta el enfoque de Bosque et al. (2006), para el cual una actividad debe establecerse según los usos más apropiados para cada porción de territorio pero sin perder de vista dos conceptos claves. El primero es la Eficiencia Espacial como la búsqueda de localizaciones que, resultando beneficiosas de manera general, perjudiquen lo menos posible a las poblaciones de sus alrededores. Una primera formulación de este principio sería colocar las instalaciones no deseables lo más alejadas que sea posible de la población residente en la zona de estudio. Para ello basta, desde un punto de vista operativo, maximizar la distancia en línea recta (se supone que las molestias se difunden de este modo) entre las instalaciones y la población. Más adecuado sería adoptar un enfoque multicriterio; la localización óptima debería basarse, como mínimo, en dos elementos: por un lado, la mayor lejanía posible a la población residente y potencialmente afectada, y, por otra parte y simultáneamente la mayor cercanía posible a los productores y usuarios de la instalación. Junto a este planteamiento sobre la eficiencia espacial cabría añadir otro principio, el de Justicia Espacial. Si bien hace referencia al grado de igualdad en la distribución de los servicios que presta cada instalación entre la población, lo que subyace en este contexto es la idea de que no deben existir concentraciones excesivas de las instalaciones no deseables en una zona de la región de estudio.

Así, mediante la incorporación, no sólo de criterios económicos, sino también de criterios ambientales y sociales en los procesos de planificación, se está caminando hacia un desarrollo territorial sostenible, el cual pretende alcanzar un equilibrio a largo plazo entre el desarrollo económico, la protección del medio ambiente, el uso eficiente de los recursos y la equidad social.

## **2.2. Factores seleccionados**

A partir de la revisión literaria presentada en los apartados anteriores, se establecen los siguientes factores y variables de evaluación de la calidad de las localizaciones de los puertos secos españoles (Tabla 1).

Tabla 1. Factores y variables recogidos de la bibliografía internacional que influyen en la calidad de la localización de los puertos secos

Categoría	Código del factor	Factor	Código de la variable	Variable	Fuente
Factores medioambientales	imp_nat	Impacto en el medio natural	DNS	Distancia a espacios naturales	Natura 2000
			CNE	Conectividad en espacios naturales	Cartografía GIS
			NIS	Número de espacios aislados	Cartografía GIS
			DFA	Densidad de la instalación	Cartografía GIS
	imp_urb	Impacto en el medio urbano	DUS	Distancia a espacios urbanos	Natura 2000
			CUE	Conectividad en espacios urbanos	Cartografía GIS
	hydro	Hidrología	DSW	Distancia a cursos superficiales	IGN
			FL	Riesgo de inundación	IGN
			GP	Presencia de acuíferos	IGN
Factores económicos y sociales	land_price	Precio del suelo	LP	Precio del suelo	INE
	dem_gro	Crecimiento potencial de la demanda	IP1	Índice de Producción Industrial	INE
			GDP	Producto Interior Bruto	INE
			EL	Tasa de paro	INE
	mun_ran	Rango del municipio de acogida	PL	Población	INE
			PD	Densidad de población	INE
Factores de accesibilidad	acc_rail	Accesibilidad a la red ferroviaria	NRA	Número de vías en el acceso ferroviario	ADIF
			IRE	Importancia de la red ferroviaria en el entorno	ADIF
			CD	Centralidad respecto a la demanda	Cartografía GIS
			QR	Calidad de la red ferroviaria	ADIF
	acc_road	Accesibilidad a la red de carreteras de alta capacidad	DAHNCN	Acceso directo a carreteras de alta capacidad	Ministerio de Fomento
			DHCR	Distancia a carreteras de alta capacidad	Ministerio de Fomento
			NL	Número de carriles	Ministerio de Fomento
	acc_air	Accesibilidad a aeropuertos	DA	Distancia a aeropuertos	Cartografía GIS
	acc_port	Accesibilidad a puertos	DP	Puertos a menos de 400 Km	Cartografía GIS
	acc_sup	Accesibilidad a servicios y suministros	CSS	Presencia de servicios y suministros	Cartografía GIS
	Factores de localización	wea	Clima	CV	Variedad climática
RL				Días anuales de lluvia	AEMET
WF				Días anuales de nevadas	AEMET
orog		Orografía	TC	Ondulación del terreno	Cartografía GIS
			SL	Pendiente del terreno	Cartografía GIS
geol		Geología	EX	Excavabilidad	IGME
			CS	Resistencia a compresión	IGME
rel_plat		Relación con otras plataformas logísticas	NNLP	Número de plataformas logísticas cercanas	Ministerio de Fomento
			NMDLP	Número de plataformas logísticas a media distancia	Ministerio de Fomento
			BICA	Pertenencia a un área industrial consolidada	Ministerio de Fomento
sup_cha		Integración en los principales corredores	DPFC	Distancia a un corredor principal de mercancías	ADIF
mod_shi		Optimización potencial del reparto modal	DPPC	Distancia a un corredor principal de pasajeros	ADIF
			NPT	Número de pasajeros en el corredor	Observatorio del transporte de mercancías por ferrocarril
			NRADT	IMD en las carreteras del entorno	Ministerio de Fomento
	DTENT		Distancia a los corredores de la Red TEN-T	Unión Europea	



### 3. METODOLOGÍA

Los factores utilizados para evaluar los problemas de localización pueden responder a la “capacidad de acogida” o a la “restricción de uso” de la ubicación. Esta ponencia es una continuación del trabajo presentado en Awad et al. (2014a; 2014b). Hasta este punto, la investigación se centraba únicamente en los factores relativos a la restricción de uso. En este trabajo, por el contrario, se evalúa la capacidad del territorio para acoger de forma sostenible los puertos secos existentes en España en la actualidad.

Para ello, se ha seguido el esquema metodológico que se presenta en la Figura 3:

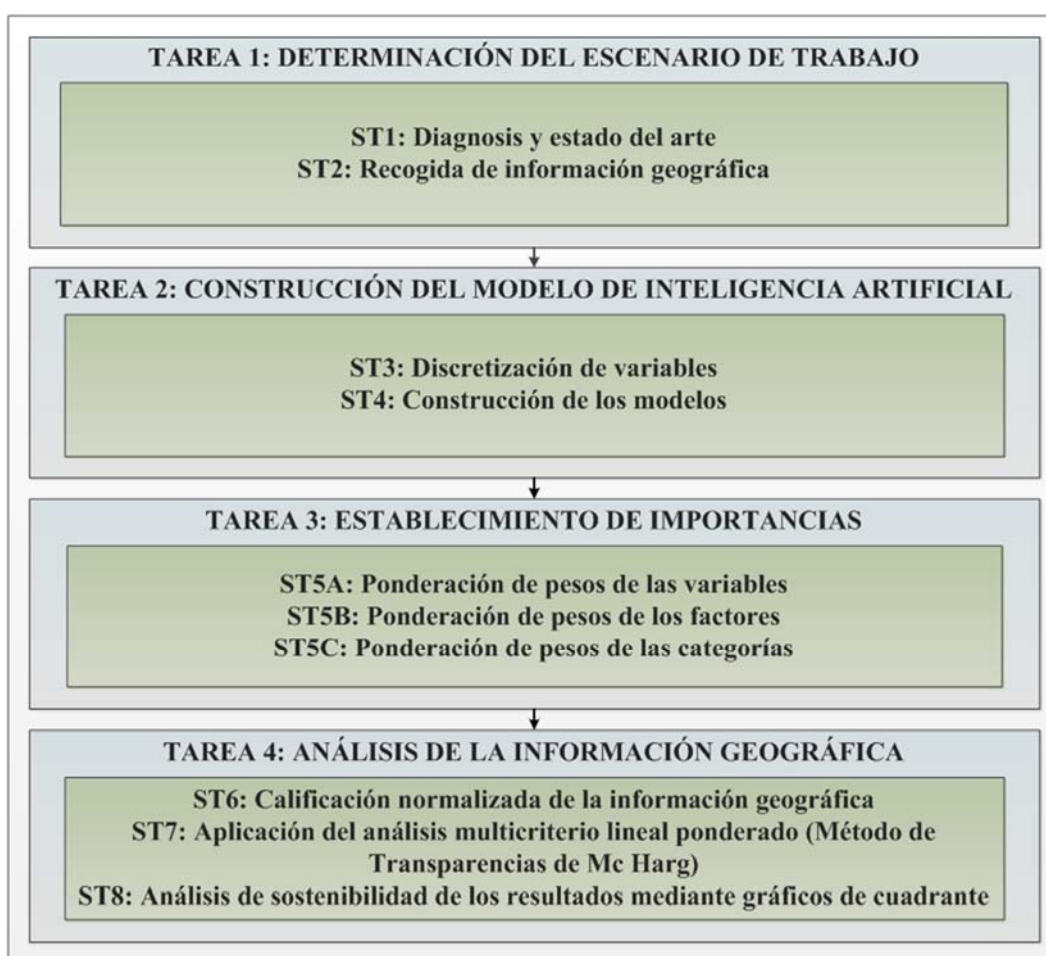


Figura 3. Esquema metodológico de la investigación

#### TAREA 1: DETERMINACIÓN DEL ESCENARIO DE TRABAJO

- *ST1: Diagnósis y estado del arte*

Consiste en la revisión del estado del arte para identificar el conjunto de factores que influyen en la calidad de la localización de los puertos secos y las variables de las que dependen. Estos factores se han agrupado en cuatro categorías: factores

medioambientales, factores socioeconómicos, factores de accesibilidad y factores de localización. Esta clasificación puede consultarse en la Tabla 1.

En esta ponencia sólo se analizan los efectos de las dos primeras categorías. Sin embargo, es necesario construir la red bayesiana con todos los factores y sus variables para explicar las relaciones de causa y efecto que se establecen entre ellas.

- *ST2: Recogida de información geográfica*

Es esta fase se extrae la información geográfica de cada uno de los factores recogidos en la Tabla 1. Para ello es necesario acudir a diferentes fuentes de información.

## TAREA 2: CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En este trabajo se han decidido utilizar Redes Bayesianas por su capacidad para representar un modelo causal por medio de una representación gráfica de las independencias/dependencias entre las variables que forman parte del dominio de aplicación. Éstas se fundamentan en la teoría de la probabilidad y combinan la potencia del teorema de Bayes con la expresividad semántica de los grafos dirigidos.

Una Red Bayesiana es una representación gráfica de una distribución de probabilidad, con dos componentes:

- Un grafo acíclico dirigido: un conjunto de nodos que representa las variables aleatorias del sistema y un conjunto de arcos que representa relaciones de dependencia directa entre las variables. Las uniones entre los nodos tienen definidas una dirección, de forma que las flechas representan influencias causales; el que un nodo sea padre de otro implica que es causa directa del mismo.
  - Un conjunto de parámetros para cada variable, normalmente distribuciones de probabilidad condicionada.
- *ST3: Discretización de variables*

Una vez seleccionadas las variables de estudio en las tareas anteriores es necesario, para el proceso de construcción de los modelos, la discretización de las variables. Normalmente las redes bayesianas consideran variables discretas o nominales, por lo que si no lo son, hay que discretizarlas antes de construir el modelo. Aunque existen modelos de redes bayesianas con variables continuas, éstos están limitados a variables gaussianas y relaciones lineales.

- *ST4: Construcción de los modelos*

En esta parte del trabajo, el aprendizaje estructural consiste en encontrar las relaciones de dependencia entre las variables, de forma que se pueda determinar la topología o estructura de la red bayesiana. De acuerdo al tipo de estructura, se aplican diferentes métodos de aprendizaje estructural: aprendizaje de árboles, aprendizaje de poli-árboles, aprendizaje de redes multiconectadas, métodos basados en medidas y búsqueda, métodos basados en relaciones de dependencia.

### TAREA 3: ESTABLECIMIENTO DE IMPORTANCIAS

- *ST5A: Ponderación de pesos de las variables*

El criterio utilizado para obtener el peso de cada factor es el siguiente: se realiza una clasificación de los factores según su estrato respecto a la variable “padre” de la red y se establecen una serie de umbrales dependientes de la “profundidad” del factor dentro de la red. Mediante la evaluación de la importancia y la profundidad del factor, le corresponde a éste un peso determinado.

El peso de cada categoría dependerá en gran medida de los pesos de los factores que la componen. Esto es debido a que una categoría será tanto más importante cuanto mayor sea la importancia de los factores incluidos en ella. Así, para obtener el peso de cada categoría, se agrupan los pesos de todos sus factores y se obtiene el valor mediano.

- *ST5B: Ponderación de pesos de los factores*

Esta ponderación se realiza mediante la aplicación de la metodología DELPHI. Se trata de un método de estructuración de un proceso de comunicación grupal para tratar un problema complejo o con múltiples criterios a tener en cuenta. Se basa en el análisis de las ideas de un grupo de expertos que se especializan en un campo de conocimiento en la búsqueda de un consenso de opinión. En Awad et al. (2014c) se recogen los resultados del cuestionario lanzado. Como puede apreciarse, en aquel trabajo sólo se emplearon 14 factores, frente a los 17 tenidos en cuenta en esta ponencia. El peso de los 3 factores adicionales se ha obtenido mediante técnicas de análisis de datos faltantes, fijando los pesos de los factores de los que ya se conocía su importancia gracias al cuestionario.

- *ST5C: Ponderación de pesos de las categorías*

El peso de cada categoría se obtiene a través de la combinación de las medianas de los pesos de las variables que componen cada uno de los factores y las medianas de los pesos de los propios factores. Este valor no se utiliza en la evaluación de la calidad de la localización de los puertos secos sino exclusivamente como factor de corrección para evitar defectos de escala en la representación gráfica de los resultados, evitando asimismo cualquier error en la interpretación de los resultados.

### TAREA 4: ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

- *ST6: Calificación normalizada de la información geográfica*

Cada factor recibe una calificación de acuerdo al valor de su información geográfica, Criteria Assessment Score, el cual responde a una combinación de diferentes variables. Esto es, tienen la forma:

$$f_k = f(x_1^i, x_2^i, \dots, x_j^i) = f(x_j^i)$$

(Ecuación 1)

Se calcula el valor de cada  $f_k(x_i^i)$  y para poder comparar los valores se normalizan en una escala de 0 a 10, siendo 0 el peor resultado y 10 el mejor (calificación de tipo beneficioso). Llamaremos al valor obtenido Criteria Assessment Score.

Para esta normalización se utiliza una interpolación segmentaria polinómica (spline) genérica:

$$P[f_k(x_j^i)] = \lambda_1 \cdot [f_k(x_1^i, x_2^i, \dots, x_j^i)]^n + \lambda_2 \cdot [f_k(x_1^i, x_2^i, \dots, x_j^i)]^{n-1} + \dots +$$

$$+ \dots + \lambda_n \cdot f_k(x_1^i, x_2^i, \dots, x_j^i) + \lambda_{n+1}$$

(Ecuación 2)

Esta expresión permite generalizar el tipo de interpolación utilizado. Sin embargo, es necesario establecer condiciones.

Para la interpolación lineal se utilizan dos condiciones que fijan los extremos del intervalo a los valores máximo y mínimo respectivamente:

$$\left\{ \begin{array}{l} P\{\max[f_k(x_j^i)]\} = 10 \\ P\{\min[f_k(x_j^i)]\} = 0 \end{array} \right\}$$

(Ecuaciones 3,4)

Si la interpolación segmentaria lineal no aproxima de manera suficiente, se utiliza una interpolación segmentaria cuadrática. Para ello, se añade una tercera condición que se suma a las condiciones de las ecuaciones 1 y 2. Esta consiste en anular la derivada primera en el extremo mayor del intervalo, para que el valor de  $P'$  sea máximo en el punto:

$$P'\{\max[f_k(x_j^i)]\} = 0$$

(Ecuación 5a)

Si la interpolación segmentaria cuadrática sigue sin suponer una aproximación suficiente, se opta por utilizar una interpolación segmentaria cúbica denominada natural, en la cual se anula la derivada segunda en los extremos del intervalo:

$$P''\{f_k(x_j^i)\} = 0 \text{ en los extremos del intervalo } [m, n]$$

(Ecuación 5b)

- *ST7: Aplicación del análisis multicriterio lineal ponderado*

Utilizando los pesos obtenidos en las fases ST5A y ST5B, los Criteria Assessment Score de la fase ST6 y, gracias a la Ecuación 6, aplicada a través de un Método de Transparencias de Mc Harg implementado sobre ArcGIS, se obtiene el valor cuantitativo de la calidad de la ubicación de los puertos secos.

$$\left\{ \begin{array}{l} LQR_i = EP \cdot \sum (CAS_{ik} \cdot w_k) \cdot W_{\bar{k}} \\ EP \in N(0,1) \\ i \in N(1, \dots, 10); k \in N(1, \dots, 17); \bar{k} \in N(1, \dots, 40) \end{array} \right\}$$

(Ecuación 6)

donde  $LQR_i$  (del inglés, Location Quality Rate) es el ratio de calidad de cada localización; EP (Environmental Protection) es la función dicotómica "Protección Ambiental", la cual sirve para descartar las áreas protegidas (vale 0 para las localizaciones protegidas y 1 para las localizaciones sin protección ambiental);  $CAS_{ik}$  (Criteria Assessment Score) es la puntuación de los criterios de evaluación para cada factor y localización. Por último, los  $w_k$  son los pesos obtenidos en el cuestionario para ponderar la importancia de cada factor y los  $W_{\bar{k}}$  son los pesos de cada uno de los factores. Por lo tanto, la ubicación con un valor de LQR más alto será la más apropiada para resolver el problema.

- *ST8: Análisis de sostenibilidad de los resultados mediante gráficos de cuadrante*

Cada uno de los puertos secos tiene calificaciones parciales para las  $\bar{k}$  categorías examinadas. En este caso, como se trata de evaluar la sostenibilidad, las categorías estudiadas son tres: el conjunto de factores medioambientales, el conjunto de factores sociales y el conjunto de factores económicos. La Red Bayesiana debe contener también las variables de localización y accesibilidad con el objetivo de establecer las relaciones existentes, ya que si se omiten, la red se reordena. Sin embargo, en este trabajo, no se han tenido en cuenta estas variables, puesto que el enfoque es evaluar la sostenibilidad de las localizaciones.

Cada uno de estos conjuntos se representa como un eje del espacio que está afectado por el peso de su categoría. Es decir, en una perspectiva axonométrica ortogonal trimétrica (ver Figura 4).



Figura 4. Perspectiva axonométrica ortogonal trimétrica en la que se representa la sostenibilidad de las localizaciones.

Los volúmenes que definen cada una de las localizaciones se encuentran inclinados con respecto al denominado “plano del cuadro”. Por ello, para facilitar su comprensión, se dibujan las proyecciones en los tres planos directores: el plano de viabilidad, formado por los ejes económico y medioambiental; el plano de equidad, formado por los ejes económico y social; el plano de soportabilidad, formado por los ejes social y medioambiental. En cada una de estas proyecciones, la tercera componente viene definida por el tamaño de un círculo coloreado. La evaluación de las tres proyecciones posibles permite evaluar la sostenibilidad de las localizaciones de los puertos secos.

#### 4. CASO DE ESTUDIO: EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA LOCALIZACIÓN DE LOS PUERTOS SECOS ESPAÑOLES. SÍNTESIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como puede verse en la Figura 5, la mayoría de los Puertos secos españoles se encuentran en el centro ( $n = 3$ ) y al norte ( $n = 6$ ) del país. Sin embargo, esta distribución no debe entenderse como una ausencia de instalaciones logísticas en el resto del país.

La razón principal es que hay una falta de uniformidad en la nomenclatura de los diferentes tipos de plataforma logísticas, ya que existe un umbral difuso entre los diferentes tipos de infraestructuras logísticas. En este trabajo se decidió estudiar únicamente los puertos secos con esa nomenclatura específica. Futuras investigaciones deberán evaluar todas las infraestructuras logísticas que, siendo Puertos secos, reciben otras denominaciones.



Figura 5. Localización de los Puertos secos españoles. Código, nombre y status de cada caso considerado.

#### **4.1. Pesos de los factores**

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en la primera del cuestionario. Para realizar el resumen de los datos se han seleccionado la media aritmética, la mediana, el primer cuartil, el tercer cuartil y el rango intercuartil.

Se han utilizado simultáneamente la media aritmética y la mediana para aprovechar las potencialidades de cada una. La media aritmética es muy intuitiva para el conjunto de expertos, al tratarse de la medida de tendencia central más usada. Sin embargo, es una medida muy sensible frente a la presencia de datos atípicos. Por ello, para el análisis estadístico riguroso de los datos se opta por el uso de la mediana.

Se selecciona asimismo el rango intercuartil como medida de variabilidad de los datos. Éste se define como la diferencia entre el tercer cuartil  $Q_3$  y el primer cuartil  $Q_1$ , es decir:  $R = Q_3 - Q_1$  y se utiliza para medir el consenso alcanzado ya que ofrece una idea muy intuitiva de la desviación de los datos respecto de la mediana.

Tabla 2. Pesos de los factores obtenidos mediante cuestionario DELPHI y análisis de datos faltantes.

Factor	Peso DELPHI	Peso datos
Impacto en el medio natural		5,00
Impacto en el medio urbano		7,25
Hidrología	6,00	
Precio del suelo	7,00	
Crecimiento potencial de la demanda		6,40
Rango del municipio de acogida	5,00	
Accesibilidad a la red ferroviaria	10,00	
Accesibilidad a la red de carreteras de alta	10,00	
Accesibilidad a aeropuertos	5,00	
Accesibilidad a puertos	10,00	
Accesibilidad a servicios y suministros	8,00	
Clima	3,00	
Orografía	5,00	
Geología	5,00	
Relación con otras plataformas logísticas		8,00
Integración en los principales corredores		5,50
Optimización potencial del reparto modal		5,05

Un análisis detallado de estos resultados del cuestionario DELPHI puede consultarse en (Awad et al., 2014). En este trabajo, algunas de los factores han cambiado respecto a la referencia anterior y otros se han empezado a considerar. Para obtener su peso, se ha realizado un análisis de datos faltantes mediante inferencia estadística manteniendo fijos los pesos de los factores que no han variado.

#### 4.2. Pesos de las variables

Una vez construida la Red Bayesiana mediante un algoritmo de tipo K2 de aprendizaje estructural (Ecuación 7), el cual permite establecer una relación de orden entre las variables, se comienza a estratificar la red.

$$P(B_S, D) = P(B_S) \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{q_i} \frac{(r_i - 1)!}{(N_{ij} + r_i - 1)!} \prod_{k=1}^{r_i} (N_{ijk})! = P(B_S) \prod_{i=1}^n g(i, \mathbf{P}\mathbf{a}_i)$$

(Ecuación 7)

Todas las estructuras son igualmente probables al inicio. Para cada nodo, el algoritmo K2 busca el conjunto de padres que maximiza (Ecuación 8).

$$g(i, \mathbf{P}\mathbf{a}_i) = \prod_{j=1}^{q_i} \frac{(r_i - 1)!}{(N_{ij} + r_i - 1)!} \prod_{k=1}^{r_i} (N_{ijk})!$$

(Ecuación 8)





de síntomas), como para hacer razonamiento predictivo (obteniendo la probabilidad de presentar un cierto síntoma suponiendo que existe una causa conocida). Una de las características de las Redes Bayesianas es que un mismo nodo puede ser fuente de información u objeto de predicción dependiendo de cuál sea la evidencia disponible. A continuación se muestran cuáles son las características de estos dos tipos de inferencia utilizando una Red Bayesiana.

Si se supone que es cierto un hecho del mundo real que está representado en la red como un nodo padre, la red puede deducir cuáles serán sus efectos; para ello se debe introducir esta hipótesis en el nodo correspondiente y propagar esta información hacia el resto de los nodos. Este modo de razonamiento es de tipo predictivo y está regido por una inferencia "deductiva" donde el conocimiento se puede expresar de la forma "si A entonces B" y se cumple que el hecho conocido es "A" y el hecho deducido es "B".

Por lo que estudiando la relación entre las variables y viendo los padres de cada variable se establecen las jerarquías de relaciones mediante un estudio de la "profundidad de la red", se analiza la red de manera que se estructuran las relaciones padres e hijos por jerarquías.

Por ejemplo las conexiones en serie (Figura 7) representan a un conjunto de variables asociadas linealmente que denota dependencia entre las variables (Puga et al., 2006).

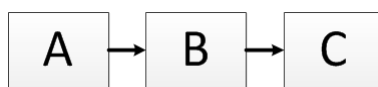


Figura 7. Conexión serial.

Si B depende de A y C de B, en términos causales diríamos que A es causa de B y que B es causa de C. En este caso, dada la dependencia entre las variables, cuando conocemos información sobre A, podemos modificar nuestra certeza sobre el estado de C; y a la inversa, cuando sabemos algo sobre el estado de C la creencia sobre el estado de A se altera (Figura 8).

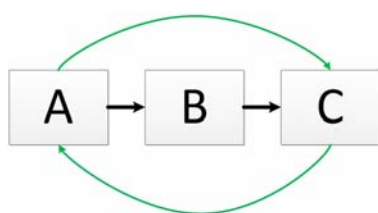


Figura 8. Flujo de información en la conexión serial.

Si el estado de B es conocido; conocer alguna información sobre A o C no modificará nuestra creencia sobre el estado de estas variables. Podríamos decir que la propagación de la información se bloquea y se dice que A y C se tornan condicionalmente independientes dado B (Figura 9).

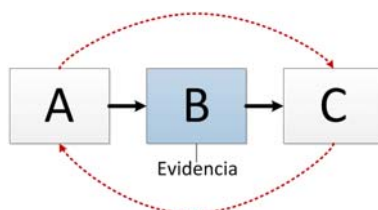


Figura 9. Evidencia en la conexión serial.

Con estas relaciones de dependencia y con el análisis de la red, se puede ver la relación jerárquica que se produce entre las variables, de manera que se puede encadenar la relación padres-hijos entre las diversas variables. En términos de *cuasa-efecto*, si A causa B, A es la causa de que ocurra B, lo que se transforma en jerarquía de nivel de importancia, más arriba en la red, mayor peso respecto a las demás variables, es decir, la “profundidad en la red” va a determinar su rango de importancia o peso.

De este modo, establecemos las relaciones en el conjunto de la red variable a variable. La variable padre de la red es DNS (Distancia a espacios naturales). Esta variable se corresponde con la máxima importancia (Estrato 1). De ella “cuelgan” una serie de variables hijo, siendo NIS (Número de espacios aislados) la única que sólo depende de DNS. Siguiendo este mismo planteamiento, se establece un orden de importancia que depende de la “profundidad” de cada variable en la red, obteniéndose los siguientes estratos (Tabla 3).

Tabla 3. Estrato de cada variable en la Red Bayesiana.

Estrato	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Descolgadas
Variables	DNS	NIS	DUS	DSW	GP	GDP	PL	DTENT	RL	NNLP	BICA	CNE
			CUE	FL	EL	PD	DAHCN	NMDLP	SL		NRADT	DFA
			CS	LP	IPI	DPFC	LQR	DHCR	WF			QR
			EX		DPPC	CV		NL	DP			CSS
			IRE		NPT	TC						
						NRA						
						DA						
						CD						
Peso	10	9,1	8,2	7,3	6,4	5,5	4,6	3,7	2,8	1,9	1	0
Leyenda	Ambiental		Económico y social		Localización		Accesibilidad		LQR			

Entre el estrato 1, con importancia 10, y el estrato 11, con importancia 1, se establece una correspondencia entre el estrato y el peso mediante interpolación lineal. Las variables que quedan descolgadas se consideran con peso 0. El hecho por el que quedan descolgadas es que todas las localizaciones tienen valores prácticamente iguales en ellas, por lo que la red no puede establecer el orden entre los elementos de la muestra. Sin embargo, no deben dejar de ser consideradas, puesto que podrían tener otras relaciones con la red si analizásemos otro conjunto de localizaciones.

De acuerdo a la importancia del conjunto de variables, puede establecerse un peso cualitativo de cada categoría:

- Categoría medioambiental: 10.
- Categoría social: 8.

- Categoría económica: 8.
- Categoría de accesibilidad: 7.
- Categoría de localización: 6.

Como ya se ha comentado, estos pesos no se utilizan en la evaluación de la calidad de la localización de los puertos secos sino exclusivamente como factor de corrección para evitar defectos de escala en la representación gráfica de los resultados que dificulten la comprensión de las figuras.

#### **4.3. Resultados del Critería Assessment Score**

Se analizan a continuación los condicionantes tenidos en cuenta para establecer el Critería Assessment Score, separados por factores:

Las puntuaciones de las variables relacionadas con los “Impactos sobre el medio natural y sobre el medio urbano” tienen en cuenta diferentes variables. La primera de ellas es la afección del ruido. Son mejores aquellas localizaciones situadas a distancias más largas de los medios naturales protegidos y las zonas urbanas. También tienen mejor puntuación las localizaciones que producen un menor número de espacios inconexos en el territorio y que se sitúan en espacios industriales consolidados que no afectan a áreas naturales o urbanas.

En cuanto a las “Afecciones hidrológicas”, las puntuaciones más altas se obtienen para lugares alejados de los cursos superficiales de agua, sin acuíferos en los alrededores y en zonas sin riesgo potencial de inundación.

El “Crecimiento potencial de la demanda” evalúa las condiciones económicas del emplazamiento en torno a tres variables: el Índice de Producción Industrial, el Producto Interior Bruto y la Tasa de Paro. Todos estos datos se contemplan en el modelo a nivel provincial, al ser la escala con mayor detalle a la que existen estos datos.

Las localizaciones con un “Precio del suelo” moderado presentan especial interés, ya que reducen los costes de inversión. Sin embargo, los terrenos más baratos son, a menudo, los que cuentan con peor acceso a las infraestructuras. Por lo tanto, tenemos que llegar a un equilibrio entre la elección del suelo más barato y la necesidad de dotar a esta zona de infraestructuras que garanticen su accesibilidad.

En el caso del “Rango del municipio de acogida”, una gran población se valora positivamente, ya que será una ventaja al garantizar una mayor demanda de los productos almacenados en el puerto seco y una mayor disponibilidad de mano de obra. Sin embargo, una alta densidad de población tiene una menor puntuación debido a que ésta supone una afección a un mayor número de personas.

Para evaluar la “Accesibilidad a la red ferroviaria” se tienen en cuenta: tipo de acceso, número de vías en la playa de acceso, la población de los municipios desde y hacia los que se accede directamente por ferrocarril (demanda potencial), la proximidad a un nudo ferroviario de importancia, la existencia de infraestructura separada para mercancías y pasajeros, si la vía está electrificada y si la vía es doble o individual. Los mejores resultados se obtienen para lugares con acceso directo, cerca de nudos ferroviarios y para vías con las máximas prestaciones.

La “Accesibilidad a las carreteras de alta capacidad” contempla: tipo de carretera en el entorno del acceso (carretera convencional, autopista de peaje, autovía), distancia a la vía de gran capacidad más cercana, número de carriles de la carretera de acceso, Intensidad Media Diaria (IMD) y Nivel de Servicio (NS) del itinerario. Los mejores lugares tienen acceso directo a rutas con buenas condiciones de infraestructura y un nivel de servicio que permite a los vehículos pesados circular de manera eficiente.

La calificación de este la “Accesibilidad a aeropuertos” se mide a través de la distancia al aeropuerto más cercano a la localización. Como resulta obvio, la distancia más corta es la que tiene una calificación mayor.

La “Accesibilidad hacia y desde los puertos marítimos” se mide a través de la distancia al puerto más cercano y el número de puertos a una distancia superior a 200 km e inferior a 400 km. Esta distancia fue seleccionada utilizando como punto de partida los estudios realizados por CAI (2011) y Atlantic Transnational Network (2006).

Para evaluar el “Clima” se tienen en cuenta: la caracterización climática de la zona, la media de precipitaciones, la desviación de la temperatura respecto a 20°C, el número de días anuales con nevadas y la velocidad media del viento.

La “Orografía” está relacionada con la pendiente y el relieve de la localización. La necesidad de dotar a los puertos secos de acceso por ferrocarril presenta unas importantes exigencias en la preparación del terreno para acoger esta instalación. Un lugar llano requerirá muy poca preparación del terreno, lo cual hace que la construcción de obra resulte más barata.

La “Geología” implica la evaluación de tres aspectos: la naturaleza del material que forma el suelo de la zona, su excavabilidad y la resistencia a la compresión del material, las cuales influyen en el precio de construcción del puerto seco.

El factor “Relación con otras plataformas logísticas” ofrece la posibilidad de evaluar la relación entre cada Puerto Seco y el resto del sistema logístico del país. Se tienen en cuenta: el número de plataformas logísticas cercanas, el número de plataformas logísticas alejadas y la pertenencia a un área industrial. Pensando en que lo ideal es optar por un modelo de colaboración competitiva que genere economías de densidad, a través de la cobertura espacial y la proximidad (Rodrigue et al., 2009), la máxima puntuación para una localización se conseguirá en lugares que minimicen el número de plataformas logísticas cercanas (para controlar la competencia) y maximicen el número de plataformas logísticas distantes (integración de todo el sistema de logístico hacia la colaboración).

La “Integración en los principales corredores” mide la distancia a la cual se sitúa la instalación respecto a los principales corredores de mercancías del país. Cuanto más próxima al corredor sea la localización, mayor capacidad tendrá para captar parte del mercado del transporte de mercancías. Por ello, las mayores puntuaciones las reciben aquellos puertos secos que se sitúan lo más cerca posible de estos corredores.

El factor “Optimización potencial del reparto modal” es una medida de la capacidad del puerto seco para influir en el reequilibrio del reparto modal potenciando en transporte ferroviario de mercancías, el cual ya hemos visto que resulta más sostenible desde el punto de vista medioambiental que la carretera. Este factor depende de: la distancia a un

corredor principal de pasajeros, el número de pasajeros del corredor, la IMD en las carreteras del entorno y la distancia a los futuros corredores planificados en la Red TEN-T. Las mayores puntuaciones se obtienen lejos de los corredores de pasajeros (salvo en los casos en que la línea admite el tráfico mixto), cuando el ferrocarril compite con carreteras congestionadas y cerca de los corredores de la Red TEN-T.

Así, cada una de las variables obtiene una calificación de acuerdo a la información geográfica recopilada en la sub-tarea ST2. Aunque se ha calculado el  $CAS_{ik}$  de las 41 variables, de cara a este estudio vamos a centrarnos únicamente en las que tienen que ver con la sostenibilidad de las localizaciones. Estos resultados se presentan en la Tabla 4a, Tabla 4b y la Tabla 6 (ésta última se analiza en el apartado 4.6).

Tabla 4a. Criteria Assessment Score de las variables medioambientales.

Categoría		Variables medioambientales								
Factor		imp_nat				imp_urb		hydro		
Variable		DNS	CNE	NIS	DFA	DUS	CUE	DSW	FL	GP
Puerto seco	I	1.50	0.00	0.00	10.00	2.50	6.67	0.76	10.00	0.00
	II	0.91	0.00	7.50	10.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00
	III	2.27	0.00	5.00	0.00	0.00	3.33	1.58	5.00	0.00
	IV	10.00	0.00	2.50	0.00	2.00	6.67	0.00	0.00	0.00
	V	5.82	0.00	2.50	10.00	2.00	8.33	0.00	10.00	10.00
	VI	2.09	0.00	7.50	10.00	0.00	0.00	4.60	10.00	0.00
	VII	2.27	0.00	5.00	10.00	3.50	3.33	4.70	0.00	0.00
	VIII	0.82	0.00	5.00	10.00	6.10	6.67	1.80	10.00	10.00
	IX	4.00	0.00	0.00	10.00	2.00	0.00	9.14	0.00	0.00
	X	6.36	0.00	0.00	10.00	0.00	0.00	0.00	5.00	0.00

Tabla 4b. Criteria Assessment Score de las variables socioeconómicas

Categoría		Variables económicas y sociales					
Factor		land_price	dem_gro			mun_ran	
Variable		LP	IPI	GDP	EL	PL	PD
Puerto seco	I	4.74	5.32	5.76	0.00	10.00	9.44
	II	5.46	9.98	8.55	4.50	0.30	9.61
	III	6.46	3.53	6.15	4.74	10.04	0.00
	IV	9.15	7.98	7.57	3.52	1.32	9.46
	V	9.15	7.98	7.57	3.52	0.61	9.12
	VI	9.02	7.98	7.57	6.46	10.00	0.00
	VII	8.76	7.98	7.57	4.65	1.85	5.46
	VIII	8.36	4.46	7.05	5.14	5.60	9.02
	IX	1.48	3.15	10.00	5.64	10.00	0.00
	X	1.48	3.15	10.00	5.64	10.00	0.00

#### 4.4. Cálculo del Location Quality Rate

Con estos valores, e introduciendo los pesos de los factores y las variables, se obtienen los resultados recogidos en la Tabla 5.

En esta tabla se presentan dos columnas para cada categoría: la primera, muestra la puntuación obtenida por cada localización en dicha categoría a través de la aplicación del algoritmo  $\sum(CAS_{ik} \cdot W_k) \cdot W_K$ ; la segunda, refleja el porcentaje de cumplimiento respecto al máximo que podría llegarse a obtener (3404,00 para la categoría medioambiental; 505,00 para la categoría social y 1.682,20 para la categoría económica).

Tabla 5. Calificaciones de las localizaciones en cada una de las categorías de la triple cuenta de resultados de la sostenibilidad.

	Total medio ambiente	% medio ambiente	Total social	% social	Total económico	% económico	
Puerto seco	I	1091,25	32,06	489,65	96,96	420,96	25,02
	II	474,30	13,93	271,25	53,71	894,31	53,16
	III	827,51	24,31	230,96	45,73	555,05	33,00
	IV	1128,98	33,17	290,42	57,51	737,53	43,84
	V	1840,98	54,08	264,72	52,42	737,53	43,84
	VI	1085,28	31,88	230,00	45,54	857,74	50,99
	VII	953,24	28,00	192,63	38,14	783,78	46,59
	VIII	1928,23	56,65	376,80	74,61	641,46	38,13
	IX	719,23	21,13	230,00	45,54	711,90	42,32
	X	537,18	15,78	230,00	45,54	711,90	42,32

Estos resultados se proyectan en el plano de soportabilidad (Figura 10). La abscisa marca el grado de calidad medioambiental de cada localización, la ordenada señala su grado de calidad social y el tamaño del punto coloreado indica su calidad económica.

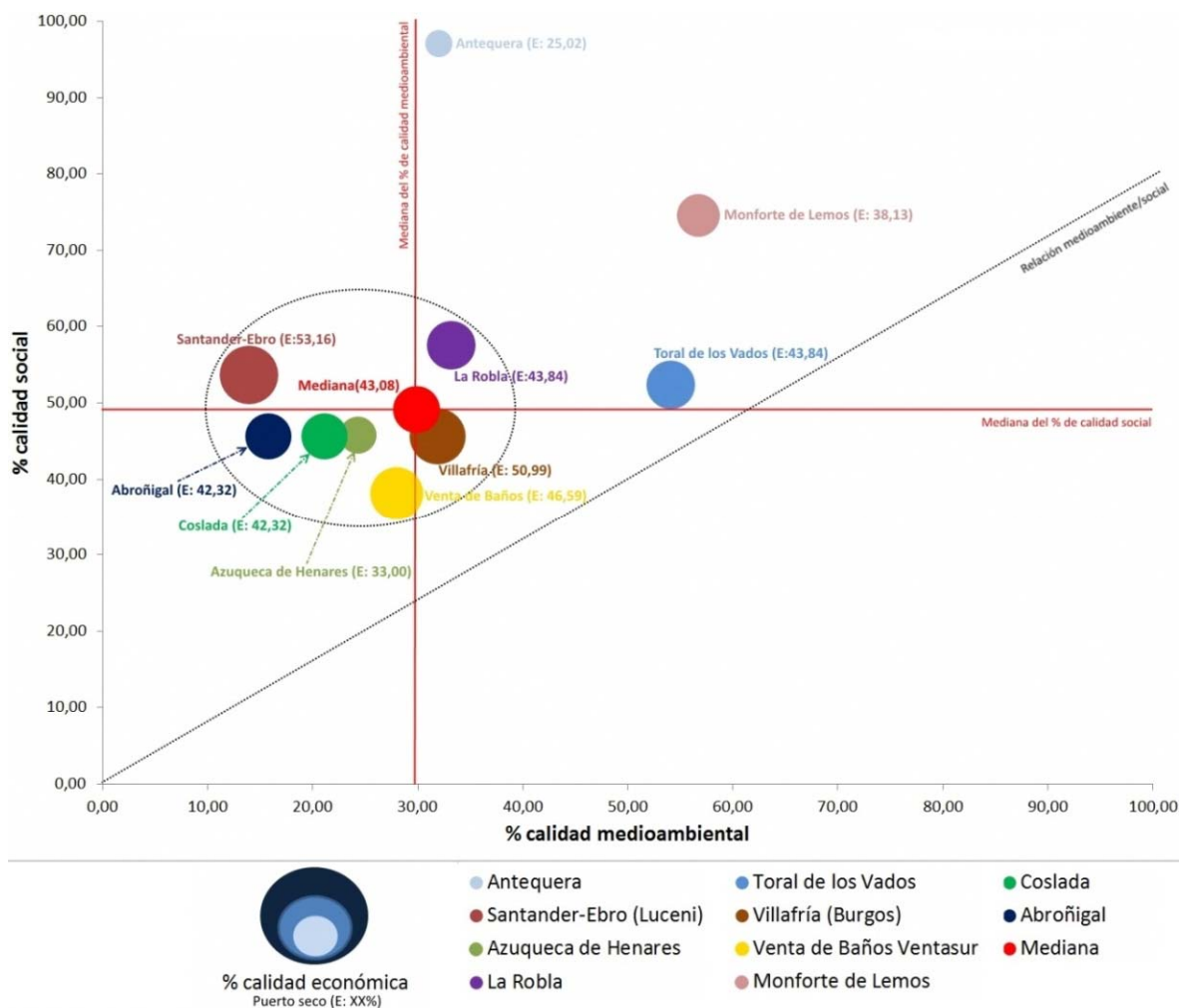


Figura 10. Proyección de los resultados del estudio en el plano de soportabilidad.

#### **4.5. Análisis de los resultados**

En este subapartado se analizan la Tabla 5 y la Figura 10 del subapartado anterior que recogen los resultados del trabajo.

A la vista de los datos medianos de los factores medioambientales, sociales y económicos, podemos afirmar que las localizaciones de los puertos secos españoles tienen una calidad moderada desde el punto de vista de la sostenibilidad.

En el apartado medioambiental destacan los puertos secos de Monforte de Lemos y Toral de los Vados, aunque si quiera estos superan el 60% de la puntuación máxima a obtener en la categoría medioambiental. El resto de localizaciones se encuentran muy agrapadas en torno al valor de la mediana. Los peor clasificados son Abroñigal y Santander-Ebro.

En el caso de Abroñigal es porque la infraestructura produce una gran fractura en el tejido urbano del sur de la ciudad de Madrid, en un área que no es propiamente industrial (aunque sí que lo fue en el pasado, es una zona en progresivo cambio hacia usos residencial y comercial), por lo que además del importante efecto barrera que produce, afecta a una población muy importante y densa. Desde el año 2007 está planteado el desmantelamiento tanto de la estación ferroviaria como el soterramiento de parte de las vías (Barqueros, 2011).

La mala calificación de Santander-Ebro se debe a bajas puntuaciones en las variables de las que dependen los factores “Impacto en el medio natural” e “Impacto en el medio urbano”. Además, se encuentra situado en una zona hidrológicamente compleja por la presencia de un gran curso superficial (el río Ebro) y acuíferos, además de tratarse de una zona con alto riesgo de inundación.

En la categoría social destaca con mucha ventaja Antequera. Esto se debe a que se sitúa lejos de la población, en una pequeña pedanía con una baja densidad de población, teniendo sin embargo un acceso muy fácil a una gran ciudad como Málaga. Estas mismas condiciones son las que hacen que Monforte de Lemos sean la segunda mejor localización en este apartado. Igual que en el caso de la categoría medioambiental, la mayoría de las localizaciones están localizadas en torno al valor de la media. La peor localización es la del puerto seco de Venta de Baños por su proximidad a los centros de población y una elevada tasa de paro en la provincia.

Si analizamos de forma conjunta la relación medioambiental-social (proyección en el plano de soportabilidad), vemos que todas las localizaciones quedan del lado social, al quedar por encima de la recta que relaciona la igualdad entre la calidad medioambiental y la calidad social (es una recta con su pendiente afectada por los pesos de cada una de las categorías). Las localizaciones más soportables son las localizaciones más cercanas a esta recta y a la vez más hacia la derecha del gráfico, es decir, Monforte de Lemos y Toral de los Vados. La localización más alejada de esta recta, a pesar de su buena calidad social, es Antequera.

En el aspecto económico destacan las localizaciones de Santander-Ebro y Burgos (Villafría), seguidos muy de cerca por Venta de Baños, La Robla, Toral de los Vados, Coslada y Abroñigal. Es decir, la calidad económica es muy homogénea, ya que solamente Monforte de Lemos, Azuqueca de Henares y Antequera quedan muy por



debajo del valor mediano. Sin embargo, en ningún caso se supera el 54% de la puntuación máxima que es posible obtener.

Analizando a la vez la soportabilidad y la categoría económica podemos evaluar finalmente la sostenibilidad de las localizaciones de los puertos secos.

Las localizaciones más sostenibles son Monforte de Lemos y Toral de los Vados, muy bien situados en términos de soportabilidad y equilibrados en el apartado económico. Les sigue de cerca Burgos (Villafría) ya que, a pesar de una menor soportabilidad, tiene una de las mejores calificaciones económicas.

Por su parte, las localizaciones menos sostenibles son Coslada, Abroñigal y Santander-Ebro, todas ellas con unas calificaciones de soportabilidad+ bajas que no consiguen compensarse en el apartado económico.

#### 4.6. Optimización del reparto modal

Además de la sostenibilidad de la propia localización, los puertos secos tienen la capacidad de mejorar la sostenibilidad del conjunto de la cadena logística, permitiendo que los modos más contaminantes y con menor capacidad de transporte tengan itinerarios lo más cortos posible: es decir, aumentando la participación del ferrocarril en las largas distancias entre el puerto marítimo y el puerto seco, dejando al transporte por carretera únicamente los últimos tramos de la cadena, donde puede aportar una mayor flexibilidad que el ferrocarril.

Analizando el factor "Optimización potencial del reparto modal" obtenemos los  $CAS_{ik}$  recogidos en la Tabla 6.

Tabla 6.  $CAS_{ik}$  del factor "Optimización potencial del reparto modal".

Código de factor	mod_shi				TOTAL	
Factor	Optimización potencial del reparto modal					
Variable	Distancia a un corredor principal de pasajeros	Número de pasajeros en el corredor	IMD de las carreteras del entorno	Distancia a los corredores de la Red TEN-T		
Código de variable	DPPC	NPT	NRADT	DTENT		
Tipo	Beneficio	Coste	Coste	Beneficio		
Puerto seco	I	277.95	288.49	48.54	186.85	801.83
	II	93.73	130.06	40.17	93.43	357.38
	III	206.85	213.83	42.37	186.85	649.91
	IV	151.90	253.66	47.54	186.85	639.95
	V	235.94	295.27	44.50	93.43	669.14
	VI	119.58	255.22	39.19	0.00	414.00
	VII	0.00	176.45	44.80	186.85	408.10
	VIII	216.54	280.48	50.02	186.85	733.90
	IX	148.67	234.19	38.41	186.85	608.13
	X	54.94	0.00	21.90	186.85	263.69

Con estos datos concluimos que las localizaciones con un mayor potencial para reequilibrar el reparto modal son Antequera, Coslada y Toral de los Vados. Las que menos ayudan a aumentar la participación del ferrocarril son Santander-Ebro y Abroñigal.

Atendiendo a la mayor sostenibilidad posible y su mayor capacidad para mejorar la sostenibilidad de la cadena logística, el puerto seco más sostenible es Toral de los

Vados, sobre todo en base a su capacidad de captar el máximo tráfico posible de los puertos de Vigo, A Coruña, Gijón y Santander.

## **5. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES**

La determinación de la calidad de una ubicación para situar diversos tipos de instalaciones es un problema geográfico con significativas repercusiones económicas, sociales y ambientales.

En este trabajo hemos estudiado el caso particular de la localización de puertos secos y nos hemos centrado en evaluar su sostenibilidad a través de un conjunto de factores (y las variables de las que depende cada factor) agrupadas según la triple cuenta de resultados de la sostenibilidad: categoría medioambiental, categoría social y categoría económica. Los resultados muestran una mayor importancia de las variables medioambientales, por lo que la sostenibilidad de las localizaciones exige un gran respeto por el medio natural y el medio urbano en que se encuadra.

También hemos evaluado la capacidad de las localizaciones para actuar sobre el reparto modal, mejorando la participación del ferrocarril que, como hemos visto, resulta mucho más sostenible en términos medioambientales que el transporte por carretera.

Para obtener los pesos de los factores se ha realizado un cuestionario DELPHI que se ha completado con un análisis de datos faltantes. La elección de esta técnica se decidió por su capacidad para alcanzar consensos en un grupo de expertos de muy diferentes especialidades.

Aunque los resultados del cuestionario revelan una mayor importancia a la hora de buscar la localización de un puerto seco a los aspectos tenidos en cuenta en las teorías clásicas de localización industrial, no deben perderse de vista el resto de aspectos, cuestión que se pone de manifiesto a través del cuestionario DELPHI, dado que ningún factor tiene un peso tan pequeño como para ser despreciado. Por ello, consideramos que esta técnica ha demostrado ser una potente herramienta para obtener información acerca de la sostenibilidad de la localización de puertos secos.

Posteriormente trabajamos con Redes Bayesianas para obtener los pesos de las variables de los que dependen los factores, lo que supone una importante aportación metodológica al tratarse de una aplicación novedosa de esta técnica. La elección de esta técnica vino por las limitaciones que la metodología DELPHI presentaba para un conjunto de 41 variables. Los pesos se han obtenido aprovechando la capacidad de clasificación de las Redes Bayesianas.

Una vez obtenidos los pesos de factores y variables, el análisis geográfico se ha realizado mediante un Método de Transparencias de Mc Harg implementado sobre ArcGIS que reproduce el algoritmo presentado en la Ecuación 6.

Mediante la triangulación de diferentes técnicas hemos establecido una metodología que sirve para evaluar la sostenibilidad de la localización de los puertos secos y que puede ser utilizada también para evaluar su calidad total. Futuras investigaciones explotarán esta metodología para establecer la calidad de las localizaciones y para fijar umbrales mínimos para los valores de cada variable que sirvan como ayuda a la hora de planificar nuevas localizaciones.

Una de las principales ventajas de esta metodología es que resulta fácilmente modificable para ser utilizada para otros usos. Por ello, puede resolver problemas de localización de otro tipo de instalaciones logísticas y resolver otros tipos de problemas geográficos utilizando un nuevo sistema de variables adaptado al nuevo caso de estudio. Un ejemplo de aplicación posible es el geomarketing, el cual es utilizado para problemas como la selección de las mejores ubicaciones productivas, la optimización de rutas de transporte o el diseño de nuevas zonas de venta. Frente al análisis estadístico de datos geográficos en que se basa, es posible plantear una alternativa con el uso de nuestra metodología.

Por último, hay que tener en cuenta que el aumento del hinterland puede interesar a puertos de diferentes países. En el caso de España, la orografía dificulta esta relación con Francia, pero puede resultar muy interesante para potenciar la cooperación transfronteriza y la integración logística con Portugal, sobre todo incluyendo Sines en un hipotético sistema logístico ibérico. Esta metodología, una vez obtenidos los umbrales de las variables, podría utilizarse para obtener la ubicación más conveniente para conectar Sines, Algeciras y Madrid.

## REFERENCIAS

ATLANTIC TRANSNATIONAL NETWORK (2006). La intermodalidad en el transporte de mercancías: puertos y hinterland, transporte marítimo incluido el transporte marítimo de corta distancia red transnacional atlántica de agentes económicos y sociales. Grupo de Trabajo «Accesibilidad ». Stuart COLE, Welsh Economics Forums, Armand Villa, CESR du Centre.

AWAD-NÚÑEZ, S., GONZÁLEZ-CANCELAS, N., SOLER-FLORES, F. (2014a). Bayesian Network methodology for the assessment of the factors influencing the location of Dry Ports, Proceedings SCIECONF (Proceedings in Scientific Conference), ISBN: 978-80-554-0891-0, ISSN: 1339-3561, vol. 2, issue 1, pp. 524--529, Zilina, Slovakia.

AWAD-NÚÑEZ, S., GONZÁLEZ-CANCELAS, N., CAMARERO-ORIVE, A. (2014b). Application of a model based on the use of DELPHI methodology and Multicriteria Analysis for the assessment of the quality of the Spanish Dry Ports location, In Press: Procedia - Social and Behavioral Sciences, XVIII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística (PANAM 2014), Junio de 2014, Santander, España.

AWAD-NÚÑEZ, S., GONZÁLEZ-CANCELAS, N., CAMARERO-ORIVE, A. (2014c). DELPHI methodology used for determining weighting factors influencing the location of Dry Ports. In Press: Journal NIE (News in Engineering), ISSN: 1339-4886.

AYDALOT, P. (1985). Economie régionale et urbaine. Paris: económica. Milieux innovateurs en Europe. Paris: Gremi.

BALLIS, A., GOLIAS, J. (2002). Comparative evaluation of existing and innovative rail-road freight transport terminals, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 36(7), pp. 593-611.

BARQUEROS, I. (2011). El transporte que no fue (10): Macroestación en Abroñigal. En: <http://ecomovilidad.net/madrid/el-transporte-que-no-fue-estacion-abronigal/>. Publicado: 14 de diciembre de 2011. Accedido: 18 de octubre de 2014.

- BERRY, B.J.L. (1979). Geographical Theories of Social Change. In Perspectives in Geography 3: the nature of change in geographical ideas, Ed. Dekalb IL: Northern Illinois University Press.
- BOSQUE, J., GÓMEZ, M., PALM, F.J. (2006). Un nuevo modelo para localizar instalaciones no deseables: ventajas derivadas de la integración de modelos de localización-asignación y SIG. En Camacho, M.T.; Cañete, J.A.; Lara, J.J. (editores): El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas Granada, Editorial Universidad de Granada, 2006, pp. 1399-1413. ISBN: 84-338-3944-6.
- BROWN, N.D. (2005). La teoría de la localización. Documento de trabajo, Universidad de Barcelona.
- CAI (2011). La logística en Aragón, capítulo 1: Infraestructuras de transporte en Aragón. ISBN 978-84-87807-43-5. Estudios de la Caja de Ahorros de la Inmaculada de Aragón.
- CAMARERO, A., GONZÁLEZ, N. (2005). Cadenas integradas de transporte. Fundación Agustín de Betancourt. Ministerio de Fomento.
- CHRISTALLER, W. (1933). Central Places in Southern Germany, Prentice Hall, Englewood Cliffs. N.J.
- Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1966.
- COMISIÓN EUROPEA (2000) IQ – Intermodal Quality. Final Report, Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme – Integrated Transport Chain.
- COMISIÓN EUROPEA (2001) European Transport Policy for 2010: Time to decide. Office for official publications of the European Communities, Luxemburg. White Paper.
- COMISIÓN EUROPEA (2010) Expert group 1. Methodology for TEN-T planning (2010). Proposal on TEN-T Network Planning.
- COSTA, M.T.; SEGARRA, A., VILADECANS, E. (2000). Pautas de localización de las nuevas empresas y flexibilidad territorial, III Encuentro de economía Aplicada. Valencia, España.
- ESTRADA, J.L. (2011). Puertos secos y generación de valor para las cargas del comercio internacional, XX congreso latinoamericano de puertos, Lima, Perú.
- GÓMEZ, G., DELGADO, O. (1998). Espacio, territorio y región: conceptos básicos para un proyecto nacional. Cuadernos de Geografía, pp. 1-2.
- GREENHUT, M.L. (1956). Plant Location in Theory and Practice, New York, 338pp.
- HANAPPE, P. (1986). Plates-formes logistique, centres de logistique, portssecsy. Recherche Transports Sécurité, INRETS, Arceuil, Decembre, 21–26.
- HESSE, M., RODRIGUE, J.P. (2004). The transport geography of logistics and freight distribution, Journal of Transport Geography, 12(3), pp. 171-184.
- HESSE, M., RODRIGUE, J.P. (2006). Global production networks and the role of logistics and transportation, Growth and Change, 37(4), pp. 499-509.

- HORMIGO, J.P. (2011). La evolución de los factores de localización de actividades. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio.
- HOTELLING, H. (1929). Stability in competition. *The Economic Journal* vol. 39 n. 153, pp. 41-57, Blackwell Publishing.
- ISARD, W. (1956). *Location and Space-Economy: A General Theory Relating to Industrial Location, Market Areas, Land Use, Trade, and Urban Structure*, New York: The Technology Press of Massachusetts Institute of Technology and John Wiley and Sons, Inc.
- KOZAN, E. (2000). Optimizing container transfers at multimodal terminals, *Mathematical and Computer Modelling*, 31(10-12), pp. 235-243.
- KRUGMAN, P.R. (1991). *Geography and trade*: MIT Press/Leuven UP, p. 142.
- LÖSCH, A. (1940). *The Economics of Location*. Traducción al inglés :New Haven, Conn: Yale University Press, 1954.
- MC CALLA, R.J. (2007). Factors influencing the landward movement of containers: the cases of Halifax and Vancouver. In: Wang, J., Olivier, D., Notteboom, T., Slack, B. (Eds.), *Ports, Cities and Global Supply Chain*, first ed. Ashgate, pp. 121–137.
- MINISTERIO DE FOMENTO. (2012). *Los transportes y las infraestructuras. Informe anual 2012*.
- MINISTERIO DE FOMENTO. (2013). *Estrategia logística de España*.
- MOSELEY, M.J. (1974). *Growth Centres Spatial Planning*. Pergamon Press, 1974 - 192 páginas.
- MUNFORD, C. (1980). Buenos Aires–Congestion and the dry port solution, *Cargo Systems International: The Journal of ICHCA*, 7(10), pp. 26-27.
- PONS, A. (2008). Localizaciones óptimas para puertos secos. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio.
- PUGA, J., GARCÍA, J., DE LA FUENTE, M.L. (2006). Modelado causal con Redes Bayesianas. XXVII Jornadas de Automática Almería 2006 - ISBN: 84-689-9417-0 199.
- REILLY, W.J. (1931). *The Law of Retail Gravitation*. Texas University (USA).
- RODRIGUE, J.P. (2006). Transportation and the geographical and functional integration of global production networks, *Growth and Change*, 37(4), pp. 510-525.
- RODRIGUE, J.P. (2006). Transportation and the geographical and functional integration of global production networks, *Growth and Change*, 37(4), pp. 510-525.
- ROSO, V. 2008. Factors influencing implementation of a dry port, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(10), pp. 782-798.

ROSO, V., WOXENIUS, J., LUMSDEN, K. (2009). The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland, *Journal of Transport Geography*, 17(5), pp. 338-345.

SCHWEITZER, M. (2011). Alta velocidad ferroviaria: la experiencia en España, Francia y Alemania y los proyectos para argentina. *Revista Transporte y Territorio* N° 5, Universidad de Buenos Aires. pp. 89-120.

SMITH, M.W. (1979). *The Economics of Physician Location*, Western Regional Conference, American Association of Geographers, Chicago, Illinois.

SOBRINO, J. (2001). El contexto espacial de las actividades económicas. *El Colegio Mexiquense*, Volumen 30 de Documentos de investigación.

UN ECE (1998). *UN/LOCODE – Code for Ports and other Locations*, Recommendation 16, Geneva.

VAN ESSEN, H., SCHROTEN, A., OTTEN, M., SUTTER, D. SCHEYER, C., ZANDONELLA, R., MAIBACH, M., DOLL, C. (2011). *External Costs of Transport in Europe*. CE Delft/Infras/Fraunhofer ISI.

VASSALLO, J.M., AWAD, S., ORTEGA, A., DE LAS HERAS, J., FERRER, J. (2014). Balance Económico: Fiscal, Social y Medio Ambiental del Sector del Transporte de Mercancías en España. In Press: Fundación Francisco Corell.

WEBER, A. (1929). *Theory of the Location of Industries*. Chicago: The University of Chicago Press (translated by Carl J. Friedrich from Weber's 1909 book).