UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA LOCALIZACIÓN DE PUERTOS SECOS

TESIS DOCTORAL
DOSIC 2015/2016

SAMIR AWAD NÚÑEZ
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Máster en Sistemas de Ingeniería Civil

Madrid, 2016

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA LOCALIZACIÓN DE PUERTOS SECOS

**TESIS DOCTORAL
DOSIC 2015/2016**

SAMIR AWAD NÚÑEZ
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Máster en Sistemas de Ingeniería Civil

Madrid, 2016

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Departamento de Ingeniería Civil - Transporte y Territorio

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA LOCALIZACIÓN DE PUERTOS SECOS

TESIS DOCTORAL
DOSIC 2015/2016

AUTOR: Samir Awad Núñez
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Máster en Sistemas de Ingeniería Civil

DIRECTORES: Alberto Camarero Orive
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Licenciado en Economía
Licenciado en Administración y Dirección de Empresas

Nicoletta González Cancelas
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Madrid, 2016

Universidad Politécnica de Madrid
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Departamento de Ingeniería Civil - Transporte y Territorio

Creative Commons 2016, del texto de Samir Awad Núñez

Reconocimiento – NoComercial – CompartirIgual (by-nc-sa): No se permite un uso comercial de la obra original ni de las posibles obras derivadas, la distribución de las cuales se debe hacer con una licencia igual a la que regula la obra original

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Departamento de Ingeniería Civil - Transporte y Territorio

Tesis Doctoral: *Metodología para la evaluación de la calidad de la localización de puertos secos*

Tribunal nombrado por el Magfco. Y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid

Presidente:

Vocal 1º:

Vocal 2º:

Vocal 3º:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis Doctoral el día de de 2016,
acuerdan otorgar la calificación de

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Madrid, a día de de 2016

Ὁ βίος βραχύς,
ἡ δὲ τέχνη μακρὴ,
ὁ δὲ καιρὸς ὀξύς,
ἡ δὲ πειρὰ σφαλερὴ,
ἡ δὲ κρίσις χαλεπή

*Vita brevis,
ars longa,
occasio praeceps,
experimentum periculosum,
iudicium difficile*

*La vida es breve;
el arte, largo;
la ocasión, fugaz;
la experiencia, confusa;
el juicio, difícil*

(Hipócrates)

AGRADECIMIENTOS

Dice el profesor y filósofo Nuccio Ordine que *“el conocimiento no es un don sino una conquista, una costosa conquista cotidiana”*. Y tras la redacción de esta Tesis Doctoral, no puedo más que estar de acuerdo con esta afirmación. Pero, por suerte, en este largo camino por el conocimiento no he estado solo y quiero que las primeras líneas de este documento sirvan para agradecer toda la ayuda voluntaria o casual, cada detalle y cada gesto que han servido para que avanzara hasta la culminación de este trabajo. Espero que os gusten estas páginas.

A mis directores, Alberto Camarero y Nicoletta González. Vuestra impronta va más allá de lo académico. Gracias por la combinación de paciencia y exigencia, por ayudarme en la fijación de plazos y objetivos. Y, sobre todo, por enseñarme cómo debe trabajar un buen investigador.

A Francisco Soler, por todo lo que he podido aprender de ti y por darle la vuelta a todas las ideas que te planteaba, en busca siempre de nuevos puntos de vista. Eso me ha permitido incluso dar con algunas de las mayores contribuciones de esta investigación.

A la profesora Violeta Roso, por contestarme con paciencia todas mis dudas sobre las relaciones que los puertos secos establecen con el territorio, llegando incluso a facilitarme sus trabajos aun cuando algunos de ellos eran inéditos. Espero que sea posible realizar la estancia de la que hemos hablado los últimos meses en Chalmers Tekniska Högskola, puesto que será la mejor manera de continuar el camino emprendido con esta Tesis Doctoral.

A los técnicos del Ministerio de Fomento, de Puertos del Estado y de la Dirección General de Ferrocarriles, por ser tan amables de proporcionarme toda la información que necesité analizar y por escuchar mis consultas con paciencia y diligencia.

A los expertos que contestaron el cuestionario DELPHI, pues sin sus respuestas esta investigación no habría sido posible.

A todas las personas que siempre que me han visto durante estos años por los pasillos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos me han preguntado por cómo llevaba la Tesis. Y, en especial, a Vicente Negro porque bien te mereces que mencione tu insistencia en que me diera prisa en terminarla y porque eres capaz de aportar con gran sencillez ideas de una profundidad pasmosa.

A mis amigos: Alberto, Eduardo, Antonio, David, Arantxa, José Ramón, Mar, Bárbara, Borjas varios (debía estar de moda el nombre en los '80), Noelia, Teresa, Pascual, Hugo, Francisco, Alberto (el de Historia), Carlos, Marta, Miguel, Alfonso, Lara y Carmen. Gracias por haber hecho todo mucho más llevadero a pesar de los tan manidos “¿De qué iba exactamente tu Tesis?” o los “¿Y cuándo la presentas?” que tanto nos sacan de quicio a los doctorandos.

A mi ya exjefe en TRANSyT, José Manuel Vassallo, por confiar en mí para trabajar en su equipo, y todos mis excompañeros, especialmente a Paola, Manuel, Javier, Juan, Fernando, Laura, Ana, Begoña, Gianni, Andrés, Victoria, Yann, Thais y Natalia. Estar rodeado de tantos genios fue seguro toda una inspiración que tiene que notarse en la Tesis. Gracias por el que, hasta ahora, ha sido mi mejor periodo laboral, tanto por lo aprendido como por lo disfrutado.

A mis compañeros de ecomovilidad.net, porque gracias a vosotros me he metido en un montón de “fregaos” y todo apunta a que lo voy a seguir haciendo. Gracias por confiar en mí, por enseñarme formas de comunicar y divulgar que no por ser extraacadémicas son menos importantes y por permitirme disfrutar cada día de unas conversaciones sobre transporte realmente enriquecedoras. He aprendido mucho de vosotros y con vosotros.

A Marta, porque lo mejor de hacer la Tesis ha sido contarte los progresos. ¡Vaya paciencia tienes! Sabes mejor que nadie de mis dudas, de mis quebraderos de cabeza, de los días que me fallaban la inspiración o las ganas, pero en esos momentos siempre has sabido escucharme, reconfortarme y motivarme. Así pues, una parte importante del mérito es tuyo. Nunca te estaré suficientemente agradecido por todo lo que has hecho. Ahora me toca a mí tomar el relevo y espero hacerlo tan bien como tú. Eso sí, me has dejado el listón muy alto.

Por último, y por encima de todo, a mi familia, mis padres y mi hermano. Habéis hecho siempre lo preciso para que yo pudiera dar lo mejor de mí mismo. Gracias por ayudarme incondicionalmente, por haberme enseñado el valor del esfuerzo y por haberme educado para ser curioso y crítico. Sobre todo por lo último, porque creo que es lo que más ha forjado mi carácter.

A vosotros y a los que me deje sin nombrar por descuido.

Gracias por toda vuestra ayuda y por alegraros por cada uno de mis pequeños pasos.

RESUMEN

La estructura económica mundial, con centros de producción y consumo descentralizados y el consiguiente aumento en el tráfico de mercancías en todo el mundo, crea considerables problemas y desafíos para el sector del transporte de mercancías. Esta situación ha llevado al transporte marítimo a convertirse en el modo más económico y más adecuado para el transporte de mercancías a nivel global. De este modo, los puertos marítimos se configuran como nodos de importancia capital en la cadena de suministro al servir como enlace entre dos sistemas de transporte, el marítimo y el terrestre.

El aumento de la actividad en los puertos marítimos produce tres efectos indeseables: el aumento de la congestión vial, la falta de espacio abierto en las instalaciones portuarias y un impacto ambiental significativo en los puertos marítimos. Los puertos secos nacen para favorecer la utilización de cada modo de transporte en los segmentos en que resultan más competitivos y para mitigar estos problemas moviendo parte de la actividad en el interior. Además, 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. 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.

Sin embargo, su potencial no es aprovechado al no existir una metodología de planificación de la ubicación de uso sencillo y resultados claros para la toma de decisiones a partir de los criterios ingenieriles definidos por los técnicos. La decisión de dónde ubicar un puerto seco exige un análisis exhaustivo de toda la cadena logística, con el objetivo de transferir el mayor volumen de tráfico posible a los modos más eficientes desde el punto de vista energético, que son menos perjudiciales para el medio ambiente. Sin embargo, esta decisión también debe garantizar la sostenibilidad de la propia localización.

Esta Tesis Doctoral, pretende sentar las bases teóricas para el desarrollo de una herramienta de Herramienta de Ayuda a la Toma de Decisiones que permita establecer la localización más adecuada para la construcción de puertos secos. Este primer paso es el desarrollo de una metodología de evaluación de la sostenibilidad y la calidad de las localizaciones de los puertos

secos actuales mediante el uso de las siguientes técnicas: Metodología DELPHI, Redes Bayesianas, Análisis Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica.

Reconociendo que la determinación de la ubicación más adecuada para situar diversos tipos de instalaciones es un importante problema geográfico, con significativas repercusiones medioambientales, sociales, económicos, locacionales y de accesibilidad territorial, se considera un conjunto de 40 variables (agrupadas en 17 factores y estos, a su vez, en 4 criterios) que permiten evaluar la sostenibilidad de las localizaciones.

El Análisis Multicriterio se utiliza como forma de establecer una puntuación a través de un algoritmo de scoring. Este algoritmo se alimenta a través de: 1) unas calificaciones para cada variable extraídas de información geográfica analizada con ArcGIS (*Criteria Assessment Score*); 2) los pesos de los factores obtenidos a través de un cuestionario DELPHI, una técnica caracterizada por su capacidad para alcanzar consensos en un grupo de expertos de muy diferentes especialidades: logística, sostenibilidad, impacto ambiental, planificación de transportes y geografía; y 3) los pesos de las variables, para lo que se emplean las Redes Bayesianas lo que supone una importante aportación metodológica al tratarse de una novedosa aplicación de esta técnica. Los pesos se obtienen aprovechando la capacidad de clasificación de las Redes Bayesianas, en concreto de una red diseñada con un algoritmo de tipo greedy denominado K2 que permite priorizar cada variable en función de las relaciones que se establecen en el conjunto de variables. La principal ventaja del empleo de esta técnica es la reducción de la arbitrariedad en la fijación de los pesos de la cual suelen adolecer las técnicas de Análisis Multicriterio.

Como caso de estudio, se evalúa la sostenibilidad de los 10 puertos secos existentes en España.

Los resultados del cuestionario DELPHI revelan una mayor importancia a la hora de buscar la localización de un Puerto Seco en los aspectos tenidos en cuenta en las teorías clásicas de localización industrial, principalmente económicos y de accesibilidad. Sin embargo, no deben perderse de vista el resto de factores, cuestión que se pone de manifiesto a través del cuestionario, dado que ninguno de los factores tiene un peso tan pequeño como para ser despreciado.

Por el contrario, los resultados de la aplicación de Redes Bayesianas, 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.

Por último, la aplicación práctica refleja que la localización de los puertos secos existentes en España en la actualidad presenta una calidad modesta, que parece responder más a decisiones políticas que a criterios técnicos. Por ello, deben emprenderse políticas encaminadas a generar un modelo logístico colaborativo-competitivo en el que se evalúen los diferentes factores tenidos en cuenta en esta investigación.

ABSTRACT

The global economic structure, with its decentralized production and the consequent increase in freight traffic all over the world, creates considerable problems and challenges for the freight transport sector. This situation has led shipping to become the most suitable and cheapest way to transport goods. Thus, ports are configured as nodes with critical importance in the logistics supply chain as a link between two transport systems, sea and land.

Increase in activity at seaports is producing three undesirable effects: increasing road congestion, lack of open space in port installations and a significant environmental impact on seaports. These adverse effects can be mitigated by moving part of the activity inland. Implementation of dry ports is a possible solution and would also provide an opportunity to strengthen intermodal solutions as part of an integrated and more sustainable transport chain, acting as a link between road and railway networks. In this sense, implementation of dry ports allows the separation of the links of the transport chain, thus facilitating the shortest possible routes for the lowest capacity and most polluting means of transport.

Thus, the decision of where to locate a dry port demands a thorough analysis of the whole logistics supply chain, with the objective of transferring the largest volume of goods possible from road to more energy efficient means of transport, like rail or short-sea shipping, that are less harmful to the environment.

However, the decision of where to locate a dry port must also ensure the sustainability of the site. Thus, the main goal of this dissertation is to research the variables influencing the sustainability of dry port location and how this sustainability can be evaluated. With this objective, in this research we present a methodology for assessing the sustainability of locations by the use of Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) and Bayesian Networks (BNs). MCDA is used as a way to establish a scoring, whilst BNs were chosen to eliminate arbitrariness in setting the weightings using a technique that allows us to prioritize each variable according to the relationships established in the set of variables. In order to determine the relationships between all the variables involved in the decision, giving us the importance of each factor and variable, we built a K2 BN algorithm. To obtain the scores of each variable, we used a complete cartography analysed by ArcGIS.

Recognising that setting the most appropriate location to place a dry port is a geographical multidisciplinary problem, with significant economic, social and environmental implications, we consider 41 variables (grouped into 17 factors) which respond to this need.

As a case of study, the sustainability of all of the 10 existing dry ports in Spain has been evaluated. In this set of logistics platforms, we found that the most important variables for achieving sustainability are those related to environmental protection, so the sustainability of the locations requires a great respect for the natural environment and the urban environment in which they are framed.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN	III
ABSTRACT	VII
ÍNDICE.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. APROXIMACIÓN AL PROBLEMA. CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA TESIS DOCTORAL	3
1.3. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA	4
1.4. APORTACIONES MÁS RELEVANTES DE LA TESIS DOCTORAL	6
1.5. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	7
2. ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1. LOGÍSTICA, TRANSPORTE INTERMODAL Y COMODALIDAD	9
2.2. LOS PUERTOS SECOS: CONCEPTO, OBJETIVOS Y CARACTERÍSTICAS	11
2.2.1. La importancia de los puertos secos	13
2.2.2. Los puertos secos como impulsores de una cadena logística más sostenible	14
2.3. TEORÍAS DE LOCALIZACIÓN INDUSTRIAL: APLICACIÓN AL CASO DE LOS PUERTOS SECOS.....	16
3. INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS EMPLEADAS EN LA PLANIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS	23
3.1. ANÁLISIS CLÚSTER.....	26
3.2. ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN Y DE DECISIÓN	27
3.3. SIMULACIÓN	27
3.4. MÉTODO DELPHI	28
3.5. SISTEMAS EXPERTOS (REDES BAYESIANAS Y REDES NEURONALES ARTIFICIALES).....	29
3.6. ESTADÍSTICA MULTIVARIANTE	32
3.7. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	32
4. PROFUNDIZACIÓN EN LAS TÉCNICAS UTILIZADAS EN ESTA INVESTIGACIÓN	35
4.1. METODOLOGÍA DELPHI	35
4.2. REDES BAYESIANAS	38
4.2.1. Construcción del modelo bayesiano	44

4.2.2.	Algoritmo empleado para la construcción de la Red Bayesiana	48
4.3.	ANÁLISIS MULTICRITERIO	50
4.4.	SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	54
5.	METODOLOGÍA DE LA TESIS DOCTORAL	59
6.	CASO DE ESTUDIO	71
6.1.	CARACTERIZACIÓN DEL PAÍS	71
6.2.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO PRÁCTICO	78
6.2.1.	Caracterización de las categorías, factores y variables del estudio	79
6.2.2.	Tratamiento de la información geográfica	84
6.2.3.	Cuestionario DELPHI	104
6.2.4.	Modelo bayesiano	113
6.2.5.	Análisis de la información geográfica	119
7.	CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES	131
7.1.	CONCLUSIONES	131
7.2.	FUTURAS INVESTIGACIONES	133
	BIBLIOGRAFÍA	137
	ANEXO 1. GLOSARIO DE TÉRMINOS RELACIONADOS CON LAS REDES BAYESIANAS	149
	ANEXO 2. CUESTIONARIO DELPHI (PRIMER LANZAMIENTO)	153
	ANEXO 3. CUESTIONARIO DELPHI (SEGUNDO LANZAMIENTO)	161
	ANEXO 4. STANDARDISED CRITERIA ASSESSMENT SCORE CODIFICADOS	173
	ANEXO 5. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE EVALUACIÓN	177
	ANEXO 6. ARTÍCULO JCR QUE DA ACCESO A LA DEFENSA DE LA TESIS DOCTORAL	185

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. EJEMPLO DE PUERTO SECO. FUENTE: PUERTO SECO DE BURGOS-VILLAFRÍA	12
FIGURA 2. EL PUERTO SECO EN LA CADENA DE TRANSPORTE	13
FIGURA 3. EXTERNALIDADES DEL TRANSPORTE EN FUNCIÓN DE LA PARTICIPACIÓN DEL FERROCARRIL Y LA CARRETERA EN EL REPARTO MODAL DEL TRANSPORTE TERRESTRE DE MERCANCÍAS.....	15
FIGURA 4. LÍNEA DEL TIEMPO DE LOS PRINCIPALES AVANCES EN LA PLANIFICACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN INDUSTRIAL	22
FIGURA 5. CLASIFICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS EMPLEADAS EN LA PLANIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS.....	26
FIGURA 6. RELACIONES ENTRE LOS NODOS EN UNA RED BAYESIANA.....	41
FIGURA 7. ESTRUCTURA DE CONEXIÓN SERIAL O CADENA CAUSAL	42
FIGURA 8. FLUJO DE INFORMACIÓN EN UNA CONEXIÓN SERIAL	42
FIGURA 9. EVIDENCIA EN UNA CONEXIÓN SERIAL	42
FIGURA 10. ESTRUCTURA DE UNA CONEXIÓN DIVERGENTE Y UNA CONEXIÓN CONVERGENTE.....	43
FIGURA 11. ESQUEMA METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN	60
FIGURA 12. ESQUEMA METODOLÓGICO DE LA METODOLOGÍA DELPHI	61
FIGURA 13. ESQUEMA METODOLÓGICO DEL ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES MEDIANTE REDES BAYESIANAS.	61
FIGURA 14. ESTRUCTURA ANIDADA PARA ORGANIZAR LAS CATEGORÍAS, LOS FACTORES Y LAS VARIABLES	63
FIGURA 15. ESQUEMA DEL CRITERIO DE “PROFUNDIDAD EN LA RED”	68
FIGURA 16. MAPA DE CARRETERAS DEL ESTADO Y RED DE GRAN CAPACIDAD A 31 DE DICIEMBRE DE 2012.....	72
FIGURA 17. MAPA DE LA RED FERROVIARIA DE INTERÉS GENERAL DEL ESTADO A 31 DE DICIEMBRE DE 2012.....	72
FIGURA 18. TIPOS DE PLATAFORMAS LOGÍSTICAS SEGÚN EL MODO PREDOMINANTE	73
FIGURA 19. PUERTOS MARÍTIMOS EN ESPAÑA.....	74
FIGURA 20. ZONAS DE ACTIVIDADES LOGÍSTICAS EN ESPAÑA.....	74
FIGURA 21. CENTROS INTEGRADOS DE MERCANCÍAS	75

FIGURA 22. TERMINALES FERROVIARIAS EN ESPAÑA	75
FIGURA 23. TERMINALES DE CARGA AÉREA EN ESPAÑA.....	76
FIGURA 24. PUERTOS SECOS EN ESPAÑA SEGÚN EL INVENTARIO DEL MINISTERIO DE FOMENTO.....	77
FIGURA 25. LOCALIZACIÓN DE LOS PUERTOS SECOS ESPAÑOLES SEGÚN EL CUMPLIMIENTO DE LOS CRITERIOS PARA SERLO	77
FIGURA 26. PROCESO DE TRATAMIENTO DE LOS DATOS GEOGRÁFICOS	84
FIGURA 27. COMPOSICIÓN DEL PANEL DE EXPERTOS PARA EL CUESTIONARIO DELPHI	104
FIGURA 28. ESQUEMA DE UN DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES GENÉRICO	107
FIGURA 29. DIAGRAMAS DE CAJAS Y BIGOTES DEL PRIMER LANZAMIENTO DEL CUESTIONARIO DELPHI	107
FIGURA 30. DIAGRAMAS DE CAJAS Y BIGOTES DEL SEGUNDO LANZAMIENTO DEL CUESTIONARIO DELPHI	109
FIGURA 31. VARIACIÓN DE LOS ESTADÍSTICOS AGREGADOS ENTRE EL PRIMER Y SEGUNDO LANZAMIENTOS DEL CUESTIONARIO DELPHI.....	113
FIGURA 32. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO K2.....	114
FIGURA 33. RED BAYESIANA DEFINITIVA CONSTRUIDA MEDIANTE UN ALGORITMO K2.....	115
FIGURA 34. RESULTADOS PARCIALES DEL LOCATION QUALITY RATE PARA LAS CATEGORÍAS MEDIOAM- BIENTAL Y SOCIOECONÓMICA Y PARA EL FACTOR OPTIMIZACIÓN POTENCIAL DEL REPARTO MODAL..	121
FIGURA 35. DIFERENCIA ENTRE LOS RESULTADOS DE LSR_i Y LSR_i'	123
FIGURA 36. RESULTADOS PARCIALES DEL LQR_i ORDENADOS POR CATEGORÍAS.....	126
FIGURA 37. PERSPECTIVA AXONOMÉTRICA ORTOGONAL TRIMÉTRICA EN LA QUE SE REPRESENTA LA SOSTENIBILIDAD DE LAS LOCALIZACIONES.....	128

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA LOCALIZACIÓN DE PUERTOS SECOS	80
TABLA 2. FACTORES RELATIVOS A LA RESTRICCIÓN DE USO	82
TABLA 3. FACTORES Y VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DE LA LOCALIZACIÓN DE LOS PUERTOS SECOS	83
TABLA 4. MCAS DEL FACTOR "IMPACTO EN EL MEDIO NATURAL"	86
TABLA 5. MCAS DEL FACTOR "IMPACTO EN EL MEDIO URBANO"	87
TABLA 6. MCAS DEL FACTOR "HIDROLOGÍA"	88
TABLA 7. MCAS DEL FACTOR "PRECIO DEL SUELO"	89
TABLA 8. MCAS DEL FACTOR "CRECIMIENTO POTENCIAL DE LA DEMANDA"	90
TABLA 9. MCAS DEL FACTOR "RANGO DEL MUNICIPIO DE ACOGIDA"	91
TABLA 10. MCAS DEL FACTOR "ACCESIBILIDAD A LA RED FERROVIARIA"	92
TABLA 11. MCAS DEL FACTOR "ACCESIBILIDAD A LA RED DE CARRETERAS DE ALTA CAPACIDAD"	93
TABLA 12. MCAS DEL FACTOR "ACCESIBILIDAD A AEROPUERTOS"	94
TABLA 13. MCAS DEL FACTOR "ACCESIBILIDAD A PUERTOS MARÍTIMOS"	95
TABLA 14. MCAS DEL FACTOR "ACCESIBILIDAD A SERVICIOS Y SUMINISTROS"	96
TABLA 15. MCAS DEL FACTOR "CLIMA"	97
TABLA 16. MCAS DEL FACTOR "OROGRAFÍA"	98
TABLA 17. MCAS DEL FACTOR "GEOLOGÍA"	99
TABLA 18. MCAS DEL FACTOR "RELACIÓN CON OTRAS PLATAFORMAS LOGÍSTICAS"	101
TABLA 19. MCAS DEL FACTOR "INTEGRACIÓN EN LOS PRINCIPALES CORREDORES"	102
TABLA 20. MCAS DEL FACTOR "OPTIMIZACIÓN POTENCIAL DEL REPARTO MODAL"	103
TABLA 21. RESULTADOS DEL PRIMER LANZAMIENTO DEL CUESTIONARIO DELPHI	106
TABLA 22. RESULTADOS DEL SEGUNDO LANZAMIENTO DEL CUESTIONARIO DELPHI	109
TABLA 23. VARIACIONES PRODUCIDAS ENTRE LAS RESPUESTAS DEL PRIMER LANZAMIENTO Y DEL SEGUNDO	112
TABLA 24. ESTRATO DE CADA VARIABLE EN LA RED BAYESIANA	116

TABLA 25. RECOPIACIÓN DE LOS PESOS DE PONDERACIÓN DE LOS FACTORES Y DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DE LA LOCALIZACIÓN DE LOS PUERTOS SECOS	118
TABLA 26. RESULTADOS PARCIALES DEL LOCATION QUALITY RATE PARA LAS CATEGORÍAS MEDIOAMBIENTAL Y SOCIOECONÓMICA Y PARA EL FACTOR "OPTIMIZACIÓN POTENCIAL DEL REPARTO MODAL"	120
TABLA 27. RESULTADOS DEL LOCATION SUSTAINABILITY RATE.....	122
TABLA 28. RESULTADOS PARCIALES DEL LOCATION QUALITY RATE ORDENADOS POR CATEGORÍAS	125
TABLA 29. RESULTADOS FINALES DEL LOCATION QUALITY RATE PARA CADA PUERTO SECO	126
TABLA 30. ESTADÍSTICOS DE LOS LOCATION QUALITY RATE.....	127

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. HIPÓTESIS NULA Y ALTERNATIVA DEL PROBLEMA DE COMPARACIÓN ENTRE SUBMUESTRAS ALEATORIAS	37
ECUACIÓN 2. ALGORITMO K2 USADO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA RED BAYESIANA.....	49
ECUACIÓN 3. CRITERIO DE APRENDIZAJE ESTRUCTURAL DEL ALGORITMO K2 UTILIZADO.....	50
ECUACIÓN 4. ESTRUCTURA DE LA META GENÉRICA i -ÉSIMA EN UN PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO CON SOLUCIÓN MEDIANTE ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES	52
ECUACIÓN 5. MÉTODO MULTICRITERIO DE SUMA LINEAL PONDERADA (SCORING) PARA EL CASO DE MINIMIZACIÓN	53
ECUACIÓN 6. MÉTODO MULTICRITERIO DE SUMA LINEAL PONDERADA (SCORING) PARA EL CASO DE MAXIMIZACIÓN	53
ECUACIÓN 7. MÉTODO MULTICRITERIO DE PROGRAMACIÓN POR METAS PARA EL CASO DE MINIMIZACIÓN	54
ECUACIÓN 8. MÉTODO MULTICRITERIO DE PROGRAMACIÓN POR METAS PARA EL CASO DE MAXIMIZACIÓN	54
ECUACIÓN 9. VECTOR DE CALIFICACIONES (CRITERIA ASSESSMENT SCORE)	64
ECUACIÓN 10. FORMA GENERAL DE UN SPLINE POLINÓMICO DE GRADO n	64
ECUACIÓN 11. CONDICIONES DE LOS EXTREMOS DEL INTERVALO PARA EL CASO DE INTERPOLACIÓN LINEAL.....	64
ECUACIÓN 12. CONDICIONES DE LOS EXTREMOS DEL INTERVALO PARA EL CASO DE INTERPOLACIÓN CUADRÁTICA.....	65
ECUACIÓN 13. CONDICIONES DE LOS EXTREMOS DEL INTERVALO PARA EL CASO DE INTERPOLACIÓN CÚBICA.....	65
ECUACIÓN 14. ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DEL LOCATION QUALITY RATE (GENERAL)	69
ECUACIÓN 15. ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DEL LOCATION QUALITY RATE (ALGORITMO DE EVALUACIÓN)	70

1. INTRODUCCIÓN

En este primer apartado se realiza la introducción al problema. En ella, se justifica la investigación, se expresan los objetivos y alcance de la Tesis Doctoral y se presentan: la producción científica, las aportaciones de la investigación y la estructura del documento.

1.1. Aproximación al problema. Contexto y justificación de la investigación

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 (con la popularización del modelo de producción *“just in time”*), han llevado a envíos más pequeños pero más frecuentes, complicando aún más las operaciones por la consecuente necesidad de sincronización y la presión más intensa sobre los sistemas de transporte (Rodrigue, 2006).

En estas circunstancias, 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 Rodrigue, 2006; Rodrigue, 2006). Sin embargo, como consecuencia de la complejidad del sector del transporte y del aumento del volumen de mercancías transportado, que se concentra en un pequeño número de puertos marítimos, se ha llegado a una situación de creciente congestión de las operaciones portuarias y de las rutas que cubren las terminales, de escasez de espacios libres en zonas portuarias y de impacto medioambiental (Mc Calla, 2007; Roso et al., 2009).

Como solución a estos problemas nace el puerto seco. Según Lévêque y Roso (2002), “Un puerto seco es una terminal de transporte intermodal terrestre conectada directamente a uno o varios puertos marítimos con una vía de transporte de gran capacidad, donde los clientes pue-

den dejar / recoger sus unidades estandarizadas de carga, como si operasen directamente con un puerto marítimo. Otras definiciones, como la de Camarero y González (2005), son bastante más explícitas a la hora de valorar los medios de transporte primordiales en estas instalaciones: “un puerto seco es una terminal intermodal de mercancías situada en el interior de un país, conectada directamente con los puertos, origen y destino de sus cargas, a través de la red ferroviaria”.

Los puertos secos, se conciben, por tanto, como solución a los problemas de espacio y requerimientos logísticos en el funcionamiento óptimo de las cadenas logísticas integradas, descongestionando los puertos marítimos, al permitir los trámites de despacho de aduanas, los controles de seguridad, el mantenimiento de contenedores y las actividades de manipulación en sus instalaciones. Por otro lado, sirven como instalaciones de consolidación de cargas, consiguiendo economías de escala en origen (cross-docking distribution) y también como medida para mitigar los impactos medioambientales frente a la ampliación de los puertos marítimos (Roso et al., 2009; Jaržemskis y Vasiliauskas, 2007; Notteboom, 2002).

Además, existe una opinión ampliamente extendida en torno a que el ferrocarril es el medio de transporte terrestre más sostenible y debe ser potenciado (Rutten, 1998; Woxenius, 1998; Ballis y Golias, 2002; Roso, 2007; Roso et al., 2009; Rodrigue et al., 2009), sobre todo para las distancias mayores de 600 Km donde además es el modo económicamente más competitivo (Ministerio de Fomento, 2011). Así, los puertos secos se presentan también como una oportunidad para fortalecer las soluciones intermodales como parte de una cadena integrada de transporte (Jaržemskis y Vasiliauskas, 2007) implicando no sólo a la carretera en el transporte entre el puerto marítimo y su hinterland sino también al ferrocarril (van Klink, 2000).

La competencia de los diferentes modos por la distribución y la diferencia en los intereses de los diversos actores que se dan lugar en los puertos secos han llevado a una situación de desorden en la distribución de mercancías que refleja la necesidad de un árbitro para la planificación de estas instalaciones y una apuesta decidida por el transporte ferroviario de mercancías, incluso con infraestructura separada de la del transporte de viajeros (Hesse y Rodrigue, 2004; Roso, 2008).

Además, el sector del transporte es un componente importante de la economía que repercute en el desarrollo y en el bienestar de la población. Cuando los sistemas de transporte son eficientes, generan oportunidades económicas y sociales, así como beneficios que redundan en la economía en general. En cambio, cuando son deficientes, pueden generar un coste económico

en términos de pérdida o disminución de oportunidades. Asimismo, el transporte cumple una misión social y tiene un impacto medioambiental que debe valorarse, en cuanto que ambos aspectos son variables fundamentales del entorno socioeconómico (Camarero y González, 2005). Por ello, en el contexto de crisis financiera, económica y presupuestaria que afecta por igual al sector público y al sector privado, se hace, si cabe, más apremiante la consecución de un modelo eficiente de transporte en el cual la buena planificación, que evite los problemas que tantas veces se han cometido y se siguen cometiendo, resulta fundamental. Según Rodrigue (2006), para ello es necesario aumentar la cuota de participación los puertos secos en la cadena, resultando por ello, un elemento estratégico clave para el éxito de la función logística la adecuada ubicación de los mismos.

Sin embargo, hasta el momento se carece de una herramienta adecuada de planificación de la ubicación de infraestructuras nodales de intercambio en general y de puertos secos en particular. Y es aquí, precisamente, donde radica la importancia de esta investigación. En esta Tesis se pretende resolver parte del problema, aportando un modelo de evaluación, apoyado en la aplicación de metodología DELPHI, Redes Bayesianas, Análisis Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica, como primer paso para la construcción de un instrumento de ayuda a la planificación de la ubicación de puertos secos frente a los intereses de los diferentes actores, teniendo en cuenta además los condicionantes a los que se enfrenta siempre la construcción de una plataforma logística de estas características.

1.2. Objetivos y alcance de la Tesis Doctoral

El objetivo principal de esta investigación es establecer una metodología capaz de evaluar la calidad de las localizaciones de los actuales puertos secos (combinando la sostenibilidad de cada localización, su calidad geográfica y su accesibilidad territorial) mediante el uso de metodología DELPHI, Análisis Multicriterio, Redes Bayesianas y Sistemas de Información Geográfica. Además, la separación de los factores y variables estudiadas, permite establecer la sostenibilidad de las localizaciones.

Como objetivos parciales de la Tesis se encuentran:

- Sub-objetivo parcial 1: identificar los problemas de la planificación de puertos secos susceptibles de ser resueltos mediante modelos basados en la combinación de Análisis Multicriterios, diferentes técnicas de ponderación de pesos (en este caso, basadas en

la metodología DELPHI y en las Redes Bayesianas) y Sistemas de Información Geográfica.

- Sub-objetivo parcial 2: generar una base de datos con información geográfica relevante para problemas de localización.
- Sub-objetivo parcial 3: establecer el conjunto de variables que influyen en la ubicación de puertos secos y otras plataformas logísticas, la importancia de cada variable y cómo se relacionan.
- Sub-objetivo parcial 4: proponer algunas de las características identificadas de un modelo mixto combinando las capacidades de las Redes Bayesianas, el Análisis Multicriterio y los Sistemas de Información Geográfica que resulte transparente para la planificación y que, a su vez, pueda ser utilizado en otras aplicaciones con una simple adaptación de las variables utilizadas en el modelo.

Los dos primeros sub-objetivos se alcanzan en la Fase 1 de la metodología planteada; el tercero y el cuarto son transversales lo largo de las Fases 1, 2 y 3.

De este modo, la investigación sienta las bases teóricas para el desarrollo futuro de un asistente a la toma de decisiones capaz de establecer las localizaciones más adecuadas para los futuros puertos secos.

1.3. Producción científica

Hasta el momento, esta investigación ha dado como resultado la siguiente producción científica, ordenada de acuerdo a su fecha de publicación:

Awad Núñez, S., González Cancelas, N. and Camarero Orive, A. (2013). Setting of weighting factors influencing the determination of the location of Dry Ports using a DELPHI methodology, Proceedings SCIECONF2013, ISBN: 978-80-554-0726-5, ISSN: 1339-3561, vol. 1, issue 1, pp. 505-510.

Awad Núñez, S., González Cancelas, N. and Camarero Orive, A. (2013). Quality evaluation of Spanish Dry Ports location based on DELPHI methodology and Multicriteria Analysis, Proceedings EIIC 2013 (Proceedings in EIIC - The 2nd Electronic International Interdisciplinary Conference), ISBN: 978-80-554-0762-3, ISSN: 1338-7871, vol. 2, issue 1, pp. 502-508.

Awad Núñez, S., González Cancelas, N. and Camarero Orive, A. (2014). Quality assessment of Spanish Dry Ports location using DELPHI methodology and Multicriteria Analysis, Journal NIE (News in Engineering), ISSN: 1339-4886, vol. 2, issue 1, pp. 24-33.

Awad Núñez, S., González Cancelas, N. and Soler Flores, F. (2014). Bayesian Network methodology for the assessment of the factors influencing the location of Dry Ports, Proceedings SCIECONF2014, ISBN: 978-80-554-0891-0, ISSN: 1339-3561, vol. 2, issue 1, pp. 524-529.

Awad Núñez, S., González Cancelas, N. y Camarero Orive, A. (2014). Aplicación de un modelo basado en el uso de metodología DELPHI y Análisis Multicriterio para la evaluación de la calidad de la localización de los puertos secos españoles, XVIII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística (PANAM 2014), Santander.

Awad Núñez, S., González Cancelas, N. and Camarero Orive, A. (2014). DELPHI methodology used for determining weighting factors influencing the location of Dry Ports, Journal NIE (News in Engineering), ISSN: 1339-4886, vol. 2, issue 2, pp. 55-62.

Awad Núñez, S., Soler Flores, F., González Cancelas, N. y Camarero Orive, A. (2014). Evaluación de la sostenibilidad de la localización de puertos secos españoles mediante el uso de Redes Bayesianas y Sistemas de Información Geográfica. 12º Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA 2014), Madrid. ISBN: 978-84-697-2060-8.

Awad Núñez, S., González Cancelas, N. and Camarero Orive, A. (2014). 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, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 162, 19, pp. 42-50, ISSN 1877-0428.

Awad Núñez, S. (2015). Propuesta metodológica para la evaluación de la calidad de las localizaciones de puertos secos, I Campus Científico del Foro de Ingeniería del Transporte.

Awad Núñez, S., González Cancelas, N., Soler Flores, F. and Camarero Orive, A. (2015). How should the sustainability of the location of dry ports be measured? A proposed methodology using Bayesian Networks and Multi-Criteria Decision Analysis. Transport, 30(3), 312-319.

Awad-Núñez, S., González-Cancelas, N., Soler-Flores, F. and Camarero-Orive, A. (2015). A Proposed Methodology for Measuring the Sustainability of the Location of Dry Ports Using Bayesian Networks and Multicriteria Decision Analysis. European Transport Conference 2015, 28-30 September 2015, Frankfurt (Germany).

Awad-Núñez, S., González-Cancelas, N., y Camarero-Orive, A. (2015). Establecimiento de los factores a considerar para determinar la zona de ubicación de un puerto seco y de sus jerarquías a través de un panel DELPHI, *Revista Transporte y Territorio*, (13), pp. 100-121, ISSN 1852-7175.

Awad Núñez, S., González Cancelas, N. y Soler Flores, F., Estudio de las relaciones entre las variables que influyen en la localización de puertos secos. *Revista: Transporte y Territorio*. Estado: en revisión.

Awad Núñez, S., Soler-Flores, F., González Cancelas, N. and Camarero Orive, A., Dry ports allocation: a Bayesian approach. *Revista: International Journal of Civil Engineering*. Estado: en revisión.

Awad Núñez, S., González Cancelas, N., Soler-Flores, F. and Camarero Orive, A., How to allocate dry ports? An Artificial Intelligence approach. *Revista: Proceedings of the Institution of Civil Engineering*. Estado: en revisión.

Awad Núñez, S., González Cancelas, N., Soler-Flores, F. and Camarero Orive, A., Spatial Planning: dry ports location incorporating a Bayesian Networks approach. Congreso: The 6th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT-2015). Estado: la ponencia fue aceptada pero finalmente no pudo ser presentada al congreso, por lo que se enviará a la siguiente edición, que se celebrará en 2016 en Madrid.

1.4. Aportaciones más relevantes de la Tesis Doctoral

Esta Tesis Doctoral supone las siguientes contribuciones a la ciencia:

- El diseño de una metodología que permite evaluar la calidad de las localizaciones de plataformas logísticas introduciendo una valoración técnica de variables medioambientales, sociales, económicas y geográficas. En este caso, se ha construido además un modelo de evaluación para el caso particular de los puertos secos.

Esta metodología sienta las bases teóricas para el desarrollo futuro de un asistente a la toma de decisiones capaz de establecer las localizaciones más adecuadas para los futuros puertos secos. En este sentido, la estructura anidada propuesta permite la implementación de este asistente en programas de Sistemas de Información Geográfica,

permitiendo así la automatización de los procesos de toma de información y de análisis territorial.

- La novedosa aplicación de una técnica de Inteligencia Artificial a la planificación territorial, las Redes Bayesianas, cuya capacidad de clasificación permite introducir en la herramienta de evaluación los pesos obtenidos de la relación entre las diferentes variables.
- El establecimiento de un nuevo criterio de clasificación que, estudiando las relaciones que se establecen entre las variables y analizando los encadenamientos padres-hijos entre ellas en el modelo bayesiano es capaz de determinar las jerarquías mediante el estudio de la *“profundidad en la red”*.

1.5. Estructura del documento

El contenido de esta Tesis Doctoral se estructura en 7 apartados y 6 anexos:

El apartado 1, es la presente *“Introducción”*. En él, se describe el problema que se pretende abordar, se plantean los objetivos que se persiguen con la realización de esta Tesis Doctoral, se adjuntan las referencias a la producción científica derivada de la investigación desarrollada, se enumeran las principales aportaciones a la ciencia derivadas de esta Tesis Doctoral y se detalla la estructura del documento.

En el apartado 2, *“Estado del Arte”*, se realiza una revisión del estado del conocimiento respecto a la logística, los puertos secos y las teorías de localización industrial.

En el apartado 3, *“Introducción a las técnicas empleadas en la planificación de infraestructuras”*, se repasan las principales técnicas que han sido o pueden ser empleadas a la planificación territorial de infraestructuras, centrando esta introducción en las siguientes: Análisis Clúster, Árboles de Decisión y de Clasificación, Simulación, Método DELPHI, Sistemas Expertos (Redes Bayesianas y Redes Neuronales Artificiales), Estadística Multivariante y Sistemas de Información Geográfica.

En el apartado 4, *“Profundización en las técnicas utilizadas en esta investigación”*, se reflexiona sobre las técnicas empleadas en la investigación y se ahonda en *por qué* y *cómo* han sido aplicadas en esta Tesis Doctoral.

En el apartado 5, *“Metodología de la Tesis Doctoral”*, se presenta el esquema metodológico propuesto y se explican las diversas fases realizadas para el desarrollo de la investigación.

En el apartado 6, *“Caso de estudio”*, tras la caracterización de las infraestructuras logísticas del país, se presenta la aplicación práctica de la metodología propuesta. En este apartado se explica cómo se ha realizado esta aplicación y se muestran y discuten los resultados del caso de estudio.

El apartado 7, *“Conclusiones y futuras investigaciones”*, recoge las principales conclusiones obtenidas durante la investigación y plantea una serie de líneas de investigación que darían continuidad a la presente Tesis Doctoral.

Por último, se enumeran las referencias bibliográficas consultadas para la realización de la presente Tesis Doctoral, y se adjuntan los siguientes anexos: 1) Glosario de términos relacionados con las Redes Bayesianas; 2) Cuestionario DELPHI (primer lanzamiento); 3) Cuestionario DELPHI (segundo lanzamiento); 4) Standardised Criteria Assessment Score codificados; 5) Resultados de la aplicación del algoritmo de evaluación; 6) Artículo JCR que da acceso a la defensa de la Tesis Doctoral.

2. ESTADO DEL ARTE

Previamente a la propia investigación propiamente dicha, aunque puede considerarse como su primera fase, se ha profundizado en el conocimiento del Estado del Arte en los siguientes temas relacionados con la Tesis Doctoral: 1) logística, transporte intermodal y comodalidad; 2) puertos secos; y 3) las principales teorías de localización industrial.

2.1. Logística, transporte intermodal y comodalidad

Se puede definir la logística como *"la función operativa que comprende todas las actividades y procesos necesarios para la administración estratégica del flujo y almacenamiento de materias primas y componentes, existencias en proceso y productos terminados; de tal manera, que éstos estén en la cantidad adecuada, en el lugar correcto y en el momento apropiado"* (Castellanos, 2004). No obstante, como puntualiza Aguilar (2005), tampoco deben descuidarse los flujos de información y de capital aunque formalmente parezca un flujo únicamente físico.

La introducción de la logística en las cadenas integradas de transporte ha supuesto una mejora económica y de rendimientos en el transporte "puerta a puerta", pero también un gran avance a la sostenibilidad y una mejora en el tratamiento medioambiental de las mismas (Camarero y González, 2005). Gracias a la implantación de plataformas logísticas se ha podido 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 en el caso de la carretera, o bien, sean utilizados para el transporte de mercancías de alto valor añadido (Roso, 2007).

Uno de los mayores hitos en el mercado de transporte en las últimas décadas ha sido la generalización del uso del contenedor como elemento unitario de carga, el cual ha permitido la consecución de economías de escala mediante la consolidación de numerosos envíos diferentes que son transportados concentrando las actividades logísticas (Rodrigue, 1999; Trip y Bon-tekoning, 2002) y la automatización de estas actividades (Notteboom y Rodrigue, 2008).

Así, la rápida evolución de la logística en el transporte marítimo de contenedores, mediante la estandarización y automatización de los procedimientos de carga y descarga de mercancías, la simplificación de los trámites aduaneros en el puerto, la creación de puertos secos y de Zonas de Actividades Logísticas, entre otras, han permitido una mayor sostenibilidad del transporte

de mercancías. En estas circunstancias, el transporte de mercancías por unidades de carga puede realizarse utilizando varios modos de transporte sin existencia de ruptura de carga, surgiendo así el concepto de transporte intermodal (Parola y Sciomachen, 2005; Camarero y González, 2005, 2007).

Por transporte Intermodal se entiende el transporte que utiliza dos o más modos de transporte en la misma unidad de carga o vehículo (Ministerio de Fomento, 2011). Es decir, utiliza unidades de transporte “unitizables” o “contenerizables” (contenedores, cajas móviles,...) y otra mercancía susceptible de transporte intermodal (coches, camiones, semirremolques, rolltrailer,...).

Una cadena de transporte intermodal debe tener las siguientes características (Camarero y González, 2005): un único lugar de origen y un único lugar de destino, utilizar varios modos de transporte, un contrato único de transporte, una única declaración de expedición, un operador responsable de toda la cadena, un envío de mercancía que no sufra transformación (ruptura de carga), un único precio desde de origen a destino y una simplificación en el trámite documental aduanero.

En los últimos años se ha popularizado el término comodalidad, aludiendo a la inclusión de la eficiencia en el uso de los modos de transporte tanto individualmente como en el marco de una integración intermodal para alcanzar una utilización de recursos óptima y sostenible (Ministerio de Fomento, 2011), si bien los términos intermodalidad y comodalidad se utilizan de forma equivalente.

Algunos autores, como Rodrigue (2006), opinan que dentro de la evolución del mercado de transporte, en el que cada vez es mayor la competencia y los márgenes de beneficio menores y donde la búsqueda de servicios eficaces y de alta calidad para el usuario parece la forma más adecuada de lograr una mayor cuota de participación, los puertos secos presentan una adecuada solución para potenciar el transporte comodal a la vez que descongestionan los puertos marítimos y dan servicio en sus instalaciones a diferentes modos de transporte que pueden, así, ser utilizados en los segmentos en que resultan más competitivos. Por ello, la elección de la ubicación de los mismos es un elemento estratégico clave para el éxito de la función logística.

2.2. Los puertos secos: concepto, objetivos y características

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 público¹, 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 Lévêque y Roso (2002) y Camarero y González (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, utilizando además el medio de transporte más sostenible y más adecuado en cada tramo (Roso et al., 2009).

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 et al., 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 Aunque la definición de UN ECE habla de instalaciones públicas, éstas pueden ser privadas. De hecho, en el caso de España, el modelo de gestión más extendido es la colaboración público-privada.

Figura 1. Ejemplo de puerto seco. Fuente: Puerto seco de Burgos-Villafria

Roso et al. (2009), clasifica los puertos secos según su distancia al puerto marítimo (o puertos) a que presta servicio en: 1) distante, 2) a media distancia y 3) cercano. Rodrigue et al. (2009) hace realiza clasificación similar en la que también es importante la distancia al puerto marítimo, pero dando más importancia a su función principal: 1) Terminales satélite, que asumen sobre todo una función de servicio a las instalaciones portuarias, acomodando el tráfico adicional y sirviendo a las funciones que han pasado a ser demasiado caras en el puerto, como el almacenamiento y depósitos de contenedores vacíos y 2) Centros de carga, que incluyen funciones bien definidas ligadas a la producción y el consumo en mercados regionales como almacenamiento, distribución y funciones logísticas. Estas funciones no son excluyentes, sino que lo ideal es la combinación de ellas en una red con diversas instalaciones para conseguir que cada modo de transporte se utilice donde es más ventajoso.

La ubicación del puerto seco determina en gran medida el éxito del trasvase de mercancía de la carretera al ferrocarril. Para favorecer que se opere mayoritariamente con ferrocarril interesan puertos secos distantes. Roso et al. (2009) fija esta distancia en el entorno de los 500 Km, mientras que otros trabajos fijan esta distancia en más de 750 Km (Newman y Yano, 2000).

Para los flujos de mercancías entrantes o salientes, el puerto seco actúa como el primer nivel de una jerarquía funcional de la cadena de transporte en el interior del país (Rodrigue et al., 2009). La Figura 2, de Jaržemskis y Vasiliauskas (2007), muestra el rol que desempeñan los

puertos secos dentro de la cadena integrada de transporte, bien sea en recepción o envío de los productos:

Figura 2. El Puerto Seco en la cadena de transporte. Fuente: elaboración propia a partir de Jaržemskis y Vasiliauskas (2007)

2.2.1. 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:

1. 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 (Hall et al., 2011).
2. 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 amplia-

ción 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).

3. 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 y Golias, 2002; Kozan, 2000) mejorando, como se verá 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, 2013a).

2.2.2. 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 se evalúa la intensidad energética y de emisiones de CO₂ para diferentes modos de transporte de mercancías, se puede apreciar que el modo de transporte terrestre de mercancías menos contaminante y con menores externali-

dades² 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 en 2012 fue respectivamente del 95,5% a favor de la primera y de 4,5% a favor del segundo (Ministerio de Fomento, 2015), podemos comprobar con facilidad que una participación mayor del ferrocarril se traduce en una cifra menor de los costes externos.

Figura 3. 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 2013, indica que en ese año se movieron un total de 134.588 millones de T-

² El impacto de los diferentes medios de transporte se establece en base a sus externalidades. Éstas son beneficios o perjuicios que una actividad genera sobre la sociedad, pero que no son compensadas con ingresos o costes. Es decir, son fallos del mercado que se producen cuando esta actividad de una produce efectos (aunque pueden ser positivos o negativos, en este caso y el resto de menciones a este concepto a lo largo del texto, se hace referencia exclusivamente a los efectos negativos) que afectan a terceras personas que no han participado en su producción o en su consumo. O, simplificado, efectos provocados en el bienestar del conjunto de la sociedad.

Km, suponiendo un coste externo total de 32.031,9 millones de €. Con una participación del ferrocarril del 10%, esta cifra se rebajaría hasta los 31.547,4 millones de €. Es decir, se ahorrarían anualmente 484,5 millones de € en externalidades.

Sin embargo, la competencia de los distintos modos de transporte y la diferencia en los intereses de las distintas partes implicadas 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, que conecte los puertos marítimos con los puertos secos. 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 se ha visto, resulta más contaminante (Hesse y Rodrigue, 2004).

Cabe destacar que hay que tener en cuenta que los criterios para la definición de la red de terminales logísticas intermodales tienen un gran impacto en la calidad del proceso de transporte intermodal y, por tanto, no todas las localizaciones son capaces de captar tráfico con la misma facilidad (Roso et al., 2015). Así, la decisión de dónde ubicar un puerto seco exige un análisis exhaustivo de toda la cadena logística, con el objetivo de transferir el mayor volumen de tráfico posible a los modos más eficientes desde el punto de vista energético, que son menos perjudiciales para el medio ambiente. Sin embargo, no hay que perder de vista que esta decisión acerca dónde ubicar un puerto seco debe garantizar la sostenibilidad de la propia localización (Awad et al., 2015) y los efectos futuros que esta implantación puede suponer para su hinterland (Bergqvist et al., 2015) y para su entorno más próximo (Macharis et al., 2014).

2.3. Teorías de localización industrial: aplicación al caso de los puertos secos

En este punto se hace una pequeña reseña de las principales teorías de la Localización industrial como punto de partida para la identificación de los factores que influyen en la ubicación de cualquier instalación industrial.

La localización óptima es aquel lugar que le proporciona a la empresa el máximo beneficio, o, para unos ingresos dados, le depara el mínimo coste (Sampedro, 1957). También comprende el

estudio de los efectos del espacio sobre la organización de la actividad económica y viceversa. La localización industrial tiene implicaciones indudables en los niveles de crecimiento económico y de bienestar social a nivel territorial, por lo que cambia las condiciones del entorno y por ello no debería hablarse de puntos óptimos sino más bien de satisfactorios (Sobrino, 2001; Hormigo, 2011). A este respecto, el alcance de esta Tesis hace que el modelo propuesto no entre en estas variaciones.

Para Costa et al. (2000) interesa destacar aquí dos aspectos relevantes de la localización industrial. En primer lugar, que las decisiones de localización difieren considerablemente según el sector de actividad de los nuevos establecimientos. En segundo lugar, que la autonomía de las empresas para decidir el emplazamiento adecuado varía considerablemente según la dimensión inicial del nuevo establecimiento.

En definitiva, existen diferentes factores que influyen en la decisión empresarial de instalarse en un lugar o trasladarse a otro. El análisis de los modelos de localización resulta interesante porque permite delimitar los aspectos fundamentales que actúan en los procesos de localización y establecer las relaciones principales entre estas variables explicativas y las decisiones finales de ubicación (Hormigo, 2011).

La diversidad de los factores que intervienen en la localización de una industria ha movido a buen número de economistas y geógrafos 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.

La Teoría de la Localización comprende el conjunto de técnicas, métodos y modelos que permiten determinar con criterio económico la ubicación óptima de una empresa o unidad económica de producción y representa una de las cuestiones centrales como disciplina académica (Sobrino, 2001).

Aunque existen estudios anteriores acerca de la localización de actividades (principalmente agrícolas, como el de Von Thünen en 1826), Weber es considerado el padre de la Teoría de la Localización Industrial gracias a la publicación de su trabajo en 1909, en el cual sin embargo sólo se tienen en cuenta factores puramente económicos.

Como se recoge en Hormigo (2011), las diferentes visiones de la teoría han ido evolucionando y adquiriendo una mayor complejidad desde los trabajos iniciales, relacionándose con los cambios producidos en la Economía y en la Teoría Económica, adaptándose a las variaciones

estructurales de la actividad industrial. Se debe entender cada avance en esta teoría dentro de su marco histórico, sin poderlos separar del contexto social en que se inscriben (Lizano, 2008). Por ello, se toman estos estudios como base para la identificación de los factores que influyen en el modelo propuesto mediante una actualización y adaptación para un caso muy particular, ya que los puertos secos no son industrias al uso, puesto que en ellos no se da una producción sino simplemente la distribución de diferentes mercancías.

Para Weber (1909), el objetivo fundamental a la hora de localizar una industria es hacer mínimos los costes de producción y, en especial, los costes de transporte y de mano de obra. Más adelante, los estudios de Hottelling (1929), Reilly (1931), Christaller (1933) y Lösch (1940) incluirán al modelo la presencia de empresas competidoras, el acceso al mayor número de competidores posible, el umbral de demanda para el que es rentable la localización, la interdependencia locacional entre estos competidores y la relación entre el tamaño de la población y el tipo de industria (Hormigo, 2011; Lizano, 2008).

En la teoría de los lugares centrales de Christaller (1933), el concepto de “alcance” relacionado con el umbral de demanda está asociado implícitamente al coste del transporte, igual que pasa en la teoría de Weber (1909). Así, los precios aumentan con la distancia hasta llegar al “alcance máximo”, punto en que ya es más rentable buscar el bien o servicio en otro lugar más cercano. Puede, por tanto, asimilarse con lo que entendemos por el hinterland del puerto seco (Hormigo, 2011; Lizano, 2008). Sin embargo, estas teorías no habían incorporado aún las pautas del transporte y las economías de escala que han modificado los volúmenes y las distancias que marcan este “alcance máximo”.

Greenhut (1956), Isard (1956) y Smith (1979) se basan en las variaciones espaciales de los costes y los ingresos considerados de forma simultánea en el tiempo, siguiendo un proceso racional de sustitución de factores con el fin de obtener la combinación más conveniente. Smith (1979) introduce además el concepto de “*valor sustraído*” que consiste en los efectos negativos (polución,...) que han de ser considerados frente a los positivos y que pueden crear externalidades negativas. En definitiva, “*la contribución total de las industria debe evaluarse teniendo en cuenta (además de los factores técnicos, económicos, sociales y culturales), las utilidades y desutilidades*”.

Moseley (1974) apunta a las relaciones con centros financieros y de servicios. Y, posteriormente, Berry (1979) y Aydalot (1985) añaden peso a las decisiones personales. En este caso se refieren a las decisiones del empresario. Sin embargo, deben considerarse en este punto tam-

bién las decisiones políticas, las regulaciones administrativas y el marco legislativo en que se enmarcan estas decisiones personales (Roso, 2008).

Krugman (1991) rescata elementos provenientes de diversos autores y escuelas teóricas para su teoría, según la cual tiende a consolidarse un sistema centro-periferia por el cual la región con mayores ventajas continuará atrayendo la localización de los agentes económicos en detrimento del área menos favorecida.

A pesar de que algunas veces la gran ciudad no sea el emplazamiento perfecto, no cabe duda que ésta sigue teniendo 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).

En este último planteamiento se considera que el espacio actúa como fallo de mercado, por lo que asumir la existencia de competencia perfecta es, aunque teóricamente válido, un supuesto en exceso restrictivo.

Según Hormigo (2011), los modelos con externalidades se han constituido como una alternativa lo suficientemente rigurosa para hacer frente a la teoría económica tradicional, apuntalada en la competencia perfecta y los rendimientos constantes a escala (sin tener en cuenta las economías de escala) y resultan especialmente atractivos para el análisis de la aglomeración de las actividades económicas.

Para Hesse y Rodrigue (2004), el espacio absoluto o físico (el suelo) constituye el factor de emplazamiento de la industria de acuerdo con dos variables (cantidad y calidad) mientras que el relativo actúa como factor de situación, interrelacionado con el anterior, según como esté afectado por la fricción de la distancia, la accesibilidad y las economías.

Así, los grandes establecimientos muestran una mayor capacidad para combinar los beneficios propios de los entornos densamente poblados y el emplazamiento de la nueva planta en los municipios vecinos que cuentan con una densidad más baja y ofrecen costes de emplazamiento más reducidos. Las pautas de localización de estos establecimientos 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 et al., 2000).

De este modo, predomina en general una localización periférica en las industrias llegando a un acuerdo entre usos de suelo urbano (terciario, transporte, residencia) y usos rurales (agricultu-

ra). Estos estudios ayudan a entender los mapas industriales, en los que se refleja la acumulación de empresas en ciertos territorios frente a su escasez en otros. Si varias empresas deducen que pueden obtener algún ahorro, por ejemplo en el coste de producción, si se localizan juntas, buscarán localizarse en aquel punto en que el ahorro sea superior al coste de transporte adicional que habrían de pagar (Hormigo, 2011; Pons, 2008).

Además, al coste del suelo hay que añadir los costes de las infraestructuras. Por ello, Hormigo (2011) considera que el coste del emplazamiento dependerá de la ubicación y de la existencia o no de las infraestructuras necesarias en la zona, o al menos en parte de ésta, infraestructuras que suponen una parte de las economías de localización para la empresa.

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. De ahí la salida de las industrias a la periferia, y la política de creación de suelo industrial para atraer industrias. 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.

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. Se puede decir que la accesibilidad aumenta en torno a las grandes aglomeraciones, y disminuye a medida que la distancia aumenta (Brown, 2005). Este gradiente de accesibilidad no se reduce uniformemente sino que alcanza unos valores máximos en los ejes y puntos de transporte privilegiados disminuyendo en los espacios intersticiales.

Esta accesibilidad repercute en el coste de transporte, factor clave que implica la distancia como se ha visto en diversas teorías de localización, que estos dependen de tres factores (Hormigo, 2011): la estructura de los costes de transportes (larga distancia) y las tarifas decrecientes con la escala; el modo de transporte y los flujos y tipo de mercancía; el volumen y el peso de la mercancía, dado que a mayor volumen hay menos costes unitarios.

Obviamente, la evolución de los transportes ha dado lugar a cambios en las pautas de localización. Así, la localización industrial ha evolucionado en paralelo al desarrollo de los transportes, desde unas primeras etapas industriales marcadas por la localización en puertos y junto a ríos navegables, hasta épocas posteriores de localización más flexible gracias al ferrocarril. En tiempos recientes, otros transportes (vehículos a motor, aviación) han generado una localización industrial más autónoma y descentralizada (Sobrino, 2001; Hormigo, 2011; Pons, 2008).

También hay que tener en cuenta el enfoque de Bosque y García (2000) y Bosque et al. (1999; 2001; 2002; 2006), para quienes 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*, entendiendo ésta 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 un segundo concepto más ligado a los aspectos sociales, el de la *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, como apunta Plata et al. (2010), 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”*.

Para una mejor comprensión del desarrollo de esta disciplina, se recoge en la Figura 4 la información más relevante acerca de los hitos más importantes producidos en la misma:

Figura 4. Línea del tiempo de los principales avances en la planificación de la localización industrial.

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica

3. INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS EMPLEADAS EN LA PLANIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS

En este apartado se realiza una revisión de las principales herramientas y modelos utilizados en la planificación de infraestructuras. A partir de esta revisión y el estudio pormenorizado de estas técnicas, ha sido posible establecer un novedoso marco metodológico que combina varias de ellas aprovechando sus ventajas

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. Desde la óptica económica, tanto si la oferta es soportada, total o parcialmente, por el Estado en sus diferentes instancias, como si cae bajo la esfera privada, la inversión realizada para "*equipar*" los asentamientos humanos exige una rentabilidad, sea ésta económica o social. La evaluación de ella constituye un paso ineludible en cualquier sistema que persiga la eficiencia y minimice las pérdidas o el despilfarro (Aparicio, 2010).

Esta lógica limitación de los recursos lleva a buscar la mayor integración posible entre las consideraciones puramente técnicas y los costes del proyecto: esa integración se conseguía tradicionalmente con el Análisis Coste-Beneficio. A esta evaluación se une, posteriormente, la evaluación del impacto ambiental como consecuencia de la integración en las Comunidades Europeas y de la obligación de aplicar la Directiva 85/337/CE (Annema y Koopmans, 2007). La aplicación de esta Directiva tiene una fuerte influencia sobre el conjunto del sistema de evaluación y su relación con la toma de decisiones, al contribuir decisivamente a formalizar un sistema de toma de decisiones sobre el proyecto basado en la utilización de sistemas de Análisis Multicriterio, en los que se integran la evaluación económica, la evaluación ambiental y los resultados de la información pública realizada a partir de la información anterior (Annema y Koopmans, 2007; Forester, 2008).

El concepto de Impacto Ambiental ha producido un giro significativo en el modo de encarar los procesos de planificación, el diseño y ejecución de las actividades humanas, la evaluación de la viabilidad de la actuación se basaba en criterios técnicos, económicos y sociales, y actualmente incluyen los criterios ambientales. La noción de impacto ambiental manejado desde el ámbito científico ha desarrollado metodologías para la identificación y la valoración de los impactos ambientales hasta el nivel indicativo que precisa toda herramienta informativa para la toma de decisiones. Sin embargo, para la Comisión Europea (2010), el Análisis Coste-Beneficio parece

haberse consolidado como una metodología útil para la evaluación de alternativas dentro de una actuación individual, pero la identificación y selección de estas actuaciones precisa de instrumentos de análisis de otro tipo, aptos para la consideración del conjunto del sistema de transporte. Además, tanto el Análisis Coste-Beneficio como el Análisis Multicriterio³ resultan ser herramientas para justificar una alternativa ya elegida (o, como mucho, valorar entre un número pequeño de ellas) más que como una ayuda para la propia decisión. Por ello, tal como expone Bourgoin y Castella (2011) a la vista de los resultados obtenidos, la búsqueda de políticas más coherentes exigirían, más que una mayor influencia de dichas herramientas, una profunda revisión del sistema de toma de decisiones (incluyendo la incorporación de los instrumentos ligados a la evaluación estratégica en las fases iniciales de planificación), un mayor acceso de la sociedad a la información sobre los proyectos objeto de evaluación y un esfuerzo de transparencia y apertura en los procesos de diálogo y concertación.

El Análisis Multicriterio permite considerar problemas de decisión con múltiples objetivos a partir de información cuantitativa. Por ejemplo, el caso de una empresa interesada en seleccionar el mejor lugar para la instalación de su planta de producción: el coste del terreno y de la construcción pueden variar de un lugar a otro, por lo que un criterio para la selección del mejor emplazamiento podría ser minimizar el coste de la adquisición del terreno y de la construcción de la instalación. Sin embargo, la empresa podría estar interesada en considerar otros criterios adicionalmente, como la disponibilidad de infraestructura y servicios para el transporte, la facilidad para la contratación de personal, el coste de la energía y las cargas impositivas locales. Este caso ilustra la complejidad de ciertos problemas de decisión, en los cuales una alternativa puede ser considerada como la mejor en función de un objetivo, pero no ser la mejor a nivel global.

Por ejemplo, Ka (2011) utilizó un sistema de ayuda a la decisión basado en un método multicriterio que tenía en cuenta seis factores que influyen en la selección de la ubicación de los puertos secos para el caso de China: transporte, nivel económico, infraestructuras, nivel de comercio, medio ambiente político y costes. Este trabajo combinó dos modelos de selección óptima de los proyectos de construcción de puertos secos: Fuzzy-AHP y ELECTRE.

Progresivamente va tomando cuerpo una evaluación complementaria, menos estructurada y nada formalizada, ligada a los efectos territoriales (también llamados a veces efectos indirectos).

³ Se refiere en este caso al Análisis Multicriterio utilizado de forma aislada, ya que sí que existen algunas formas para automatizar la toma de decisiones para un número grande de escenarios como, por ejemplo, su integración en Sistemas de Información Geográfica.

tos) de la actuación. Si bien algunos de estos efectos se incluyen en ocasiones dentro del Análisis Coste-Beneficio o figuran dentro del Análisis Multicriterio, se carece de una sistemática de análisis. Proliferan así estudios dispares, sin una metodología consolidada (Forester, 2008). Los efectos sobre el territorio se convierten de este modo en la parte más incierta de la evaluación de las grandes infraestructuras de transporte.

Al ser éste un problema con largo recorrido, han surgido también algunas técnicas más modernas que tratan de resolverlo pero que, no obstante, no han terminado de tener un reflejo en la toma de decisiones por parte de las Administraciones Públicas ni por los agentes privados.

Sin embargo, debido a la naturaleza estocástica de las características fuertemente no lineales de los datos geográficos, los métodos de Inteligencia Artificial han recibido mucha atención desde comienzos de los años 90 y se consideran como alternativas a los modelos estadísticos tradicionales. Las más importantes que han sido aplicadas son: Análisis Clúster, Árboles de Clasificación y de Decisión, Análisis de Escenarios Futuros (Simulación), DELPHI, Sistemas Expertos (Redes Bayesianas y Redes Neuronales Artificiales) y los Sistemas de Información Geográfica.

A continuación se resumen algunas experiencias de aplicación de estas técnicas en la planificación de transportes, de acuerdo a la clasificación de la Figura 5.

Figura 5. Clasificación de las metodologías empleadas en la planificación de infraestructuras. Fuente:
Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica

3.1. Análisis Clúster

El Análisis Clúster es un método multivariante que mide la similitud entre variables. Una vez medida la similitud se agrupan en grupos homogéneos internamente y diferentes entre sí. Los Análisis Clúster han sido aplicados, entre otras investigaciones, para la clasificación de estaciones ferroviarias, permitiendo una mejor comprensión de las interrelaciones entre las estaciones de ferrocarril y su contexto, obteniendo así una herramienta para la planificación estratégica de los usos del suelo (Zemp et al., 2011). Para ello, se establecen como variables la frecuencia de pasajeros, el rendimiento de cada estación, las necesidades y condiciones de la localización, la densidad de uso del suelo y de servicios de transporte y el uso de la estación (distinguiendo entre: laboral, tiempo libre y turismo). Una vez aplicado el modelo, se aprecian patrones geográficos comunes y dinámicas específicas que ayudan a discernir las clases, de forma que pueden valorarse las exigencias de cada clase y planificar en consecuencia.

Otra aplicación es el diseño de terminales portuarias (González, 2007). En esta investigación se desarrolla una metodología que permite determinar los parámetros de diseño de terminales portuarias de contenedores clasificadas a partir de datos de tráfico marítimo. Se obtienen así grupos de terminales, estudiando los parámetros de diseño de la operativa y los datos de tráfico. Estas agrupaciones se corrigen por capacidad y grado de saturación, obteniendo las funciones que representan estos parámetros, así como los ratios de gestión y explotación.

3.2. Árboles de Clasificación y de Decisión

Los Árboles de Clasificación y de Decisión son bastante populares en Data Mining, pudiéndose usar para clasificación y regresión. Son útiles para la exploración inicial de datos y apropiados cuando hay un número elevado de datos, y existe incertidumbre sobre la manera en que las variables explicativas deberían introducirse en el modelo. Sin embargo, no constituyen una herramienta demasiado precisa de análisis. Son pocos los modelos de planificación del transporte que utilizan un conjunto de Árboles de Decisión para apoyar la toma de decisiones. Peng y Luan (2011) describe la aplicación de un algoritmo de aprendizaje de Árboles de Decisión en la elección modal a la hora de realizar un viaje, de forma que las externalidades del transporte y del crecimiento de población se equilibren con la conservación del medio ambiente. Los resultados de esta investigación muestran que las reglas obtenidas por el método del Árbol de Decisión tienen valor práctico como ayuda a la elección del tráfico modal con la ventaja fundamental de que se interpretan los resultados con una gran facilidad.

Quijada-Alarcón et al. (2012) propone un modelo basado en Árboles de Decisión para la ordenación del territorio aplicado al caso de Panamá. Este modelo atiende al impacto de los nodos logísticos sobre la economía y el desarrollo regionales y analiza las sinergias existentes entre ellos, como método de ayuda a la planificación de la infraestructura que forma parte de la cadena logística.

3.3. Simulación

Las técnicas de Escenarios Futuros y Simulación se basan en la recreación de un retrato significativo y detallado de un plausible mundo futuro cuando se realiza una actividad, en el que los planificadores pueden ver claramente y aprender los problemas, desafíos y oportunidades que tales circunstancias pueden presentar y la comparativa con lo que pasaría en el caso de no realizar esta actuación (Aguilera et al., 2009). La información para la creación de estos escenarios puede ser a partir de encuestas (Richardson et al., 1995) o mediante el establecimiento de unos indicadores de los cuales se simula la evolución hasta el escenario futuro (Litman, 2007). La generación y simulación de escenarios exploratorios externos es un instrumento útil en los procesos de planificación y toma de decisiones, de especial relevancia en el ámbito territorial, cuyo calado en el proceso de planificación en España es escaso hasta la fecha (Soria et al., 2009).

En Aguilera et al. (2009) se expone el diseño de un modelo sencillo, aplicable en entornos metropolitanos que permite la estimación de demandas de nuevo suelo urbano en el contexto de diferentes escenarios futuros a partir de información fácilmente accesible, con el apoyo de mapas. A partir de variables agrupadas en bloques (evolución de la población, evolución del número de hogares, evolución del nivel de renta, evolución de la superficie residencial y evolución de la superficie de suelo productivo), se presentan tres escenarios futuros con las posibles tendencias de las demandas de ocupación del suelo para los casos particulares de las áreas metropolitanas de Madrid y Granada. El análisis de estos escenarios permite evaluar las posibles consecuencias espaciales y territoriales de los procesos de crecimiento metropolitano.

Otra aplicación de la simulación se da en Parola y Sciomachen (2005) para determinar el posible crecimiento de los tráficos intermodales de contenedores en una red formada por un conjunto de puertos. Esta investigación analiza la potencialidad del sistema dando especial atención al transporte terrestre y al reequilibrio en el reparto modal del mismo. Se evalúan tres escenarios en el periodo entre 2002 y 2012 que permiten conocer el volumen de tráfico. De este modo, se puede planificar la composición de las flotas de camiones y trenes. El resultado de la investigación arroja la necesidad de aumentar el transporte ferroviario debido a la congestión de las carreteras y esto exige dotar al ferrocarril de nuevas infraestructuras.

En el campo de la logística, la metodología propuesta por González y Camarero (2012a) utiliza la modelización de las líneas de espera en diversas terminales españolas utilizando los inputs básicos de la teoría de colas, es decir, las distribuciones de llegadas y servicios a buques y el número de servidores o puestos de atraque. Una vez construido el modelo, las simulaciones proporcionan información relevante sobre los grados de ocupación y eficiencia en los muelles y sobre las esperas relativas de los buques, permitiendo optimizar la gestión estratégica de las terminales.

3.4. Método DELPHI

El método DELPHI es un procedimiento prospectivo subjetivo con estricta metodología y una vasta experiencia en los más diversos ámbitos de aplicación (Rowe y Wright, 2001). El método DELPHI 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 (Linstone y Turoff, 1975).

Esta visión planificadora que se puede conseguir mediante el método DELPHI ha sido utilizada también por McKinnon y Forester (2000), en este caso para conocer las tendencias en el trans-

porte de mercancías. El estudio arroja una continuidad en la tendencia del volumen de transporte pero con unas características diferentes, con mercancías más personalizadas que son enviadas directamente al consumidor sin pasar por los comercios tradicionales, y pone de manifiesto la necesidad de un reequilibrio modal así como la internalización de las externalidades del transporte.

En el campo de la localización industrial, MacCarthy y Atthirawong (2003) presenta un amplio conjunto de factores que pueden influir en las decisiones de localización para actividades internacionales a partir de la consulta a un panel de expertos. Los cinco principales factores identificados que pueden influir poderosamente en las decisiones internacionales de localización en general fueron: costes, infraestructura existente, características del trabajo, factores políticos y factores económicos. Identifica además algunos subfactores de importancia creciente como la protección de las patentes, la disponibilidad de recursos de gestión y los costes de integración en el nuevo entorno. Estos factores tienen implicaciones sobre la gestión de la empresa que tiene la intención de establecerse en un lugar determinado y en el desarrollo de las políticas de los gobiernos locales.

3.5. Sistemas expertos (Redes Bayesianas y Redes Neuronales Artificiales)

Los Sistemas Expertos son sistemas informáticos que simulan a los expertos humanos en un área específica. Con los Sistemas Expertos se busca una mejor calidad y rapidez en las respuestas dando así lugar a una mejora de la productividad del experto (Gómez, 1998). Dentro de los Sistemas Expertos, encontramos las Redes Bayesianas y las Redes Neuronales Artificiales.

En la práctica, las Redes Bayesianas se utilizan para conocer la probabilidad a posteriori de cierta variable de interés dado un conjunto de hallazgos (Gómez, 1998). Están, pues, a medio camino entre las técnicas estadísticas y las de inteligencia artificial. Aluja (2001) señala que, como en el caso de las Redes Neuronales Artificiales, las Redes Bayesianas, deben ser entrenadas mediante aprendizaje en base a casos dados.

En el estudio de Janssens et al. (2004) se comparan las Redes Bayesianas con los Árboles de Decisión para la representación de los mecanismos de comportamiento y los principios que los individuos y los hogares utilizan para organizar sus actividades. Los resultados de la investigación muestran que las Redes Bayesianas superan las posibilidades de los Árboles de Decisión y

que son más adecuadas para captar la complejidad subyacente de la toma de decisiones. Sin embargo, en 2006, otra investigación de los mismos autores, analiza las desventajas de las Redes Bayesianas por resultar un tanto limitadas en términos de interpretación y de eficiencia cuando las reglas se derivan de la red. Por contra, las reglas derivadas de los Árboles de Decisión, en general, tienen una sencilla interpretación. Así, se aborda la idea de combinar ambas herramientas con el fin de mantener las ventajas potenciales de cada una. Los resultados de este estudio sugieren que este sistema integrado se puede utilizar para el modelado diferentes facetas de elección con un mejor poder predictivo que los Árboles de Decisión y una interpretación de los resultados mejor que con Redes Bayesianas.

Partiendo de la premisa de que los ratios empleados para planificación y explotación de terminales de contenedores españolas no se ajustan a la realidad del sistema portuario español como consecuencia de la falta de caracterización de los parámetros físicos de las terminales, González y Camarero (2012b) y González et al. (2012) muestran la aplicación de una nueva metodología, en este caso, inteligencia artificial, mediante el empleo de modelos gráficos probabilísticos, para determinar los parámetros óptimos de explotación y planificación portuaria, a través de la clasificación de las terminales añadiendo la inferencia de escenarios virtuales. Las Redes Bayesianas representan una distribución de probabilidad multivariante de las variables físicas de la terminal y, asociada a cada nodo de la red hay una distribución de probabilidad condicionada a los padres de cada nodo, de manera que la distribución conjunta factoriza como el producto de las distribuciones condicionadas asociadas a los nodos de la red. Dada la red obtenida se confirma que la superficie total de la terminal (área en que opera la terminal) se puede elegir como elemento de planificación.

Las Redes Bayesianas llevan tiempo incorporándose a tareas de clasificación supervisada pero no al caso de planificación en lo relacionado con las plataformas logísticas, en base a ideas expuestas por Michalski (1983) y Hernández Orallo et al. (2004) y ampliadas en Pearl (1988) según las cuales se pueden utilizar las factorizaciones de probabilidad representadas por las Redes Bayesianas para realizar clasificaciones, considerando para ello la existencia de una variable especial, la variable a clasificar, que viene a ser predicha por un grupo de variables, el resto, y de forma que la estructura de la red obtenida puede ser utilizada para la predicción del valor de la clase de esta variable a clasificar, mediante la asignación de valores a las predictoras, y la posterior propagación de la evidencia introducida en la red, esto es, mediante el cálculo de la probabilidad a posteriori del nodo asociado a la variable especial dados los valores del resto.

Las Redes Neuronales Artificiales han sido utilizadas ampliamente en la planificación de transportes. Dougherty (1995) realiza una revisión de las aplicaciones que habían tenido hasta la fecha las Redes Neuronales Artificiales en el campo del transporte donde queda patente este hecho.

Ledoux (1997) utiliza las Redes Neuronales Artificiales para modelizar el tráfico privado y aplicar el pronóstico a sistemas de gestión inteligente del tráfico que controlan el tráfico urbano en tiempo real mediante la vinculación del flujo de tráfico con las comunicaciones de la señalización en base a la longitud de las colas y los flujos de salida. Sin embargo, es una investigación que no se ha realizado con datos experimentales y en el artículo se incide en la necesidad de ello para extraer unas conclusiones válidas.

Para el establecimiento de una medida para comparar la eficiencia de los servicios de transporte público en función de una serie de indicadores de gestión, Costa y Markellos (1997) propone un enfoque basado en las Redes Neuronales Artificiales por la gran flexibilidad que ofrecen, muy superior a las técnicas tradicionales y porque, gracias a ellas, no es necesario conocer a priori la relación entre las variables que intervienen. El autor destaca que, por ello, las Redes Neuronales Artificiales tienen un gran potencial para el desarrollo de aplicaciones que ayuden a la toma de decisiones.

También han sido ampliamente utilizadas en predicción. Entre otras, en la investigación de Moscoso et al. (2011) para realizar predicciones del tráfico Ro-Ro en el Estrecho de Gibraltar, las cuales permiten el establecimiento de herramientas que ayuden en futuras tomas de decisiones en los distintos organismos aduaneros a partir de las previsiones, permitiendo así adelantar la preparación de las infraestructuras portuarias. También las han utilizado Celikoglu y Cigizoglu (2007a; 2007b), para predecir la demanda de transporte público; entre otros muchos, o Murat y Ceylan (2006), para modelizar la demanda en el transporte de energía.

Fuera del ámbito del transporte, las Redes Neuronales Artificiales han sido aplicadas en un número inmenso de problemas. Algunas aplicaciones son: conversión de texto a voz (y viceversa), comprensión de imágenes, reconocimiento de patrones y caracteres, procesamiento de señales, filtro de ruido, servocontrol, modelización económica y financiera, análisis de datos faltantes, etc (Basogain, 2008). Por ejemplo, en España, en el Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (SIANI, 2011), se vienen desarrollando en los últimos años trabajos en una gran variedad de campos aplicables a la planificación: optimización del mantenimiento de instalaciones,

toma de decisiones ante múltiples objetivos en conflicto (rutas, planificación de la distribución en base a la producción, optimización logística global), ubicación óptima de industrias y servicios, minimización de impactos, simulación de problemas no lineales de alta complejidad, etc.

3.6. Estadística Multivariante

En la literatura se plantea en cierto modo la competencia entre las técnicas de Estadística Multivariante y el uso de las técnicas de Inteligencia Artificial. Sin embargo es necesario entender que estas metodologías para el análisis de datos no están compitiendo y existe una considerable superposición entre los dos campos (Paliwal y Kumar, 2009). Por ello, desde la perspectiva de esta Tesis Doctoral, se entiende que las técnicas estadísticas son una herramienta complementaria y no un rival para las técnicas de Inteligencia Artificial y pueden ser utilizadas como una ayuda y una manera de validar e interpretar cómo funcionan éstas.

Los métodos de análisis multivariante se usan principalmente para buscar las variables menos representativas dentro de un conjunto amplio de variables para poder eliminarlas, simplificando así modelos estadísticos en los que el número de variables sea un problema y para comprender la relación entre varios grupos de variables. Karlaftis y Vlahogianni (2011) presenta una revisión de las diferencias y similitudes entre estos métodos y las Redes Neuronales Artificiales y establece cuándo debe usarse cada técnica. La conclusión de esta investigación es que resulta recomendable el uso de las Redes Neuronales Artificiales cuando: 1) es necesaria una buena obtención del resultado de una predicción sin importar mucho la forma en que se obtienen estos pronósticos, 2) el proceso de generación de datos reales es desconocido o difícil de identificar, 3) las suposiciones idealizadas de otros modelos, como los estadísticos (por ejemplo, normalidad, linealidad, estacionalidad, etc) no son válidos y 4) los métodos tradicionales producen resultados a los que se llega a través de un trabajo tedioso y casi imposible de interpretar.

3.7. Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica constituyen una potente herramienta para resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica. La línea de investigación de los sistemas de apoyo a la decisión cuenta ya con una cierta tradición y prometedores avances en diversos campos, como denotan las publicaciones existentes e incluso la existencia de una

revista (*Decision Support Systems*) centrada en esa temática ya en los años '80 (Bosque, 1997). No obstante, subsisten problemas conceptuales y metodológicos (Er, 1988).

Con ellos es posible resolver con más facilidad complejos problemas de asignación óptima de actividades al territorio, considerando para ello tanto su aptitud intrínseca, como el posible impacto ambiental de la localización, en ese punto del territorio, de una concreta actividad. La localización multiobjetivo, constituye uno de los más importantes procesos de toma de decisiones empleados en el manejo y planificación del uso del suelo, especialmente bajo objetivos conflictivos (Barba-Romero y Pomerol, 1997; Barredo y Bosque, 1999). Un importante elemento auxiliar en esta tarea son las Técnicas de Evaluación Multicriterio (Bosque y García, 2000). Esta interacción de técnicas multicriterio con tecnologías de Sistemas de información Geográfica, ha sido utilizada en numerosas investigaciones, abriendo un gran campo de posibilidades en el estudio de temas de amplia base territorial (Pons; 2008; Dorado et al., 2009; Freeman et al., 2011). Según Malczewski (2004), la sumatoria lineal ponderada (WLC, Weigth Lineal Combination) y el método de jerarquías analíticas (AHP, Analytic Hierarchy Process) son los más utilizados en la asignación de usos del suelo, si bien últimamente se han venido aplicando Técnicas de Evaluación Multicriterio Borrosa, todavía con ciertas limitaciones, especialmente cuando se trabaja con una gran cantidad de factores en los modelos.

Moreno (1999) revisa los modelos de optimización de la localización empleados hasta el momento y propone un nuevo modelo de resolución del problema con Sistemas de Información Geográfica. Aprovecha además el creciente interés social por las cuestiones ambientales desarrollando un modelo de optimización unificado que tenga en cuenta estos aspectos y no sólo los criterios económicos. Finalmente, a modo de ejemplo, realiza una aplicación simple para localizar un auditorio en el que se realizarán conciertos nocturnos dentro del municipio de San Sebastián de los Reyes.

Latorre (2012), utiliza los Sistemas de Información Geográfica para obtener la localización óptima de bases de bicicletas públicas en Madrid. A partir de información estadística y cartográfica, identifica los principales puntos de demanda potencial evaluadas en diferentes escenarios en función del número de bases incluidas en cada propuesta. Establece así la demanda asignada a las estaciones en las soluciones alcanzadas para cada uno de los escenarios propuestos y permite caracterizar las bases según se trate de espacios de generación o atracción de viajes, con el fin de determinar las necesidades de bicicletas a lo largo del día.

Pero, sin duda, el autor que más ha investigado en este campo en España es Joaquín Bosque Sendra, quien ha realizado numerosos estudios encaminados a la planificación territorial y la búsqueda de emplazamientos para las actividades no deseables (entre las que se encuadran los puertos secos debido a sus externalidades). Estos estudios son principalmente teóricos, donde desarrolla los conceptos de justicia espacial y eficiencia espacial, definidos con anterioridad, para obtener modelos de localización-asignación como Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial a partir de la combinación de Sistemas de Información Geográfica y Técnicas de Evaluación Multicriterio. También existen otras referencias del mismo autor que aplican esta teoría para la localización, por ejemplo, de centros de tratamiento de residuos (1999) o de gasolineras (2006).

En la misma línea, Azcárate (2007) resuelve un problema de localización de instalaciones de recogida de residuos sólidos urbanos, así como los de su tratamiento posterior, en el marco de la metodología multicriterio, permitiendo identificar, en el municipio de El Espinar (provincia de Segovia), las zonas más aptas con un menor impacto ambiental. La aplicación de la metodología multicriterio se realiza en una serie de etapas que permiten la jerarquización y ponderación de diversos factores, teniendo presente la mayor o menor dificultad de su medición individual, así como la integración secuencial de los resultados parciales obtenidos.

De especial interés para esta Tesis es la investigación de Pons (2008), puesto que se centra en la búsqueda de ubicaciones óptimas para puertos secos mediante un Sistema de Información Geográfica que se alimenta a través de una hoja de cálculo. Las referencias a este estudio y a las diferentes etapas de desarrollo de la teoría general de localización de instalaciones industriales que ya se han presentado, constituyen la base teórica para el establecimiento del conjunto de factores que influyen en la ubicación de puertos secos que se tienen en cuenta en el modelo desarrollado por esta Tesis Doctoral.

4. PROFUNDIZACIÓN EN LAS TÉCNICAS UTILIZADAS EN ESTA INVESTIGACIÓN

Como ya se ha mencionado, la decisión entre las consideraciones puramente técnicas y los costes de los proyectos se ha realizado tradicionalmente por medio del Análisis Coste-Beneficio. Desde las últimas décadas del s. XX, el Análisis Multicriterio ha ido ganando importancia para considerar en los proyectos también los criterios establecidos en la Evaluación de Impacto Ambiental. Además, se están tratando de aplicar técnicas novedosas para resolver problemas de planificación, las cuales han sido introducidas en los apartados anteriores.

En esta Tesis Doctoral se han utilizado las siguientes técnicas: Metodología DELPHI, Redes Bayesianas, Análisis Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica. A continuación se presenta cada una de ellas.

4.1. 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 (Linstone y Turoff, 1975).

El método DELPHI sigue una estricta metodología. La literatura científica suele hablar de 4 fases (Landeta, 1997, 1999):

1. Definición de objetivos.

En esta primera fase se plantea la formulación del problema y un objetivo general que estaría compuesto por el objetivo del estudio, el marco espacial de referencia y el horizonte temporal para el estudio.

2. Selección de expertos.

Esta fase presenta dos dimensiones:

- a. Dimensión cualitativa: se seleccionan en función del objetivo prefijado y atendiendo a criterios de experiencia posición, responsabilidad, acceso a la información y disponibilidad.

- b. Dimensión cuantitativa: elección del tamaño de la muestra en función de los recursos medios y tiempo disponible.

3. Elaboración y lanzamiento de los cuestionarios.

Es necesario redactar un cuestionario para encuestar a los expertos. La elaboración del cuestionario debe ser llevada a cabo según ciertas reglas: las preguntas deben ser claras, concisas y rápidas de contestar, de forma que los expertos se vean predispuestos a responder sin un esfuerzo elevado.

Además, las respuestas de los expertos deben ser cuantificables y ponderadas. Se pueden formular cuestiones relativas al grado de ocurrencia (probabilidad) o de importancia (prioridad). En ocasiones, se recurre a respuestas categorizadas (Sí / No; Mucho / Medio / Poco; Muy de acuerdo / De acuerdo / Indiferente / En desacuerdo / Muy en desacuerdo) y después se tratan las respuestas en términos porcentuales tratando de ubicar a la mayoría de los consultados en una categoría (Astigarraga, s.f.).

Es importante también que haya un espacio para que los expertos expresen su opinión con cierta flexibilidad. Para ello, es bueno habilitar un espacio para sus observaciones al final del cuestionario. El feedback de los expertos resulta fundamental para extraer posteriormente las conclusiones del estudio.

Tras la elaboración de los cuestionarios, estos se envían a los expertos. En ocasiones es preferible avisar a los expertos antes del lanzamiento del cuestionario y en ocasiones es preferible el envío directo del cuestionario. Eso sí, en ambos casos es necesario acudir a más expertos de los que son necesarios en el estudio (dimensión cuantitativa), de forma que si algunos no finalizan el proceso, el cuestionario siga teniendo validez. Lo ideal, para tener bien ordenada toda la información tras el envío de todas las respuestas de los expertos es tener preparados de antemano los estadillos en los que se recogerá la información recabada.

La falta de independencia de los expertos puede constituir un inconveniente, por lo que es recomendable realizar el cuestionario de manera anónima, bien por vía telefónica, postal o electrónica, evitando los efectos de “líderes”.

Suelen ser necesarios varios lanzamientos del cuestionario. El primero, completamente en blanco; en los sucesivos, además del cuestionario, se le deben enviar a cada experto las opiniones de sus colegas, abriendo así un debate transdisciplinario con la finalidad de obtener un

consenso en los resultados y una generación de conocimiento sobre el tema. El objetivo es tratar de conseguir consenso, por medio de la interrogación a expertos con cuestionarios sucesivos, a fin de poner de manifiesto convergencias de opiniones y deducir eventuales consensos. Cada experto argumentará los pros y los contras de las opiniones de los demás y de la suya propia.

Aunque la formulación teórica del método Delphi propiamente dicho comprende varias etapas sucesivas de envíos de cuestionarios, de vaciado y de explotación, los estudios se limitan normalmente a dos etapas, lo que sin embargo no afecta a la calidad de los resultados tal y como lo demuestra la experiencia acumulada (Rowe y Wright, 2001). Además, con dos rondas, se reduce el tiempo necesario para realizar el estudio y se evitan las deserciones que se producen en cada fase del cuestionario.

4. Explotación de resultados.

Consiste en el análisis de las respuestas del cuestionario y el feedback con la información. Suele ser suficiente con un análisis descriptivo de la muestra y el establecimiento del criterio de alcance del consenso.

Un criterio que puede utilizarse es la medida del rango intercuartílico. Si éste disminuye significativamente entre fases sucesivas, cabe esperar que se haya logrado el consenso. También pueden establecerse umbrales de forma que, una vez que se reduzca el rango intercuartílico por debajo de este umbral, se considere alcanzado el consenso.

Otra forma de evaluar el consenso del panel de expertos consiste en el uso de una prueba estadística basada en una técnica de validación cruzada. En resumen, la muestra de los datos de los expertos encuestados (criterios de pesos) se divide en dos submuestras de igual tamaño con elementos elegidos de forma aleatoria. Posteriormente, se comparan las respuestas de ambas submuestras a fin de encontrar diferencias significativas mediante un contraste de hipótesis donde las hipótesis nula y alternativa son las siguientes:

$$H_0: \mu_{\text{submuestra 1}} = \mu_{\text{submuestra 2}}$$

$$H_a: \mu_{\text{submuestra 1}} \neq \mu_{\text{submuestra 2}}$$

Ecuación 1. Hipótesis nula y alternativa del problema de comparación entre submuestras aleatorias

Este procedimiento se repite 1000 veces, con grupos seleccionados al azar. El resultado fue es distribución *p-valores*. Si el valor más probable de este *p-valor* (medida del nivel de significación para evaluar la probabilidad de incurrir en un *error de Tipo I*, también denominado *error de Tipo α* o *Falso Positivo*, del contraste de hipótesis) es inferior a 0,05; podemos concluir que el nivel de consenso es lo suficientemente bueno y se puede parar en este punto el cuestionario (Bueno et al., 2014).

4.2. Redes Bayesianas

La Minería de Datos (Data Mining) es el proceso de extraer información no trivial y potencialmente útil a partir de grandes conjuntos de datos disponibles en las ciencias experimentales (registros históricos de observaciones, reanálisis, simulaciones, etc.), proporcionando información en un formato legible para poder ser usada para resolver problemas de diagnosis, clasificación o predicción. Tradicionalmente, este tipo de problemas se resolvían de forma manual aplicando técnicas estadísticas clásicas, pero el incremento del volumen de los datos ha motivado el estudio de técnicas de análisis automáticas que usan herramientas más complejas. Por lo tanto, la Minería de Datos identifica tendencias en los datos que van más allá de un análisis simple. Técnicas modernas de Minería de Datos (reglas de asociación, árboles de decisión, modelos de mezcla de Gaussianas, algoritmos de regresión, redes neuronales, máquinas de vectores soporte, Redes Bayesianas, etc.) se utilizan en ámbitos muy diferentes para resolver problemas de asociación, clasificación, segmentación y predicción (Roche, 2002).

Entre los diferentes algoritmos de Minería de Datos, los modelos gráficos probabilísticos (en particular las Redes Bayesianas) constituyen una metodología elegante y potente basada en la probabilidad y la estadística que permite construir modelos de probabilidad conjunta manejables que representan las dependencias relevantes entre un conjunto de variables (cientos de variables en aplicaciones prácticas). Los modelos resultantes permiten realizar inferencia probabilística de una manera eficiente. Así, a partir de un conjunto de registros de observaciones, se establecen unas relaciones de preferencia que configuran una red formada por un conjunto de nodos, mientras que los enlaces muestran las dependencias importantes aprendidas de forma automática a partir de los datos.

Para entender correctamente los términos que se van a mencionar a continuación se presenta en el Anexo 1 un completo glosario de los conceptos empleados para explicar el contenido relativo a las Redes Bayesianas.

Formalmente, una Red Bayesiana es:

- Un conjunto de variables proposicionales, V .
- Un conjunto de relaciones binarias definida sobre las variables de V , E .
- Una distribución de probabilidad conjunta sobre las variables de V .

tales que:

- (V, E) forman un grafo acíclico, conexo y dirigido G .
- (G, P) cumplen las hipótesis de independencia condicional, también llamadas de separación direccional, que se enuncian a continuación.

Es decir, una Red Bayesiana es un grafo dirigido acíclico cuyos nodos representan variables y los arcos que los unen codifican dependencias condicionales entre las variables (Castillo, 1997). O, de forma más simple, una representación gráfica de dependencias para razonamiento probabilístico, en la cual los nodos representan variables aleatorias y los arcos representan relaciones de dependencia directa entre las variables.

Cuando se trata de estructuras de modelos de decisiones muy grandes y complejas, se procura centrar las decisiones en los parámetros y valores en condiciones de certeza que asumen los criterios de decisión. El mejor tratamiento que se le ha podido dar al manejo de la incertidumbre es la probabilidad y dentro de la inteligencia artificial es notable el uso del método bayesiano como herramienta principal para la definición de hipótesis resultantes del manejo de inferencias dentro del marco del manejo de información probabilística. Por ello, las Redes Bayesianas son un área creciente e importante para la investigación y aplicación en todos los campos de la Inteligencia Artificial. Para su construcción es necesario procesar y descifrar grandes cantidades de datos, tal que sea posible extraer el conocimiento presente en la muestra de datos (Basel Committee on Banking Supervision, 2001). La toma de decisiones es tratada como un proceso de optimización en donde se recomienda la mejor alternativa en base a la optimización de la utilidad esperada, dadas las observaciones de los factores externos y preferencias que haga la toma de decisiones. En el proceso de construcción de una Red Bayesiana para la toma de decisiones, es importante definir el problema teniendo claras todas las características del conflicto, tal que, posteriormente sea posible recolectar los datos que serán las variables fundamentales en el desarrollo del proyecto y se plantee un modelo del cual sea viable obtener la mejor solución que se acople a las necesidades del proyecto.

En la actualidad hay desarrollos que permiten medir el grado de incertidumbre de las relaciones de dependencia de entre las variables, ya que las Redes Bayesianas modelizan un fenómeno mediante un conjunto de variables y las relaciones de dependencia entre ellas. Dado este modelo, se puede hacer inferencia bayesiana; es decir, estimar la probabilidad posterior de las variables no conocidas, en base a las variables conocidas. Estos modelos pueden tener diversas aplicaciones, para clasificación, predicción, diagnóstico, etc. Además, pueden dar información interesante en cuanto a cómo se relacionan las variables del dominio, las cuales pueden ser interpretadas en ocasiones como relaciones de causa-efecto. Inicialmente, estos modelos eran contruidos “a mano” basados en un conocimiento experto, pero en los últimos años se han desarrollado diversas técnicas para aprender a partir de datos, tanto la estructura como los parámetros asociados al modelo. Incluso, permiten aprender sobre relaciones de dependencia y causalidad, permitiendo combinar conocimiento experto con datos (Sucar, 1992).

Una Red Bayesiana representa en forma gráfica las dependencias e independencias entre variables aleatorias, en particular las independencias condicionales. Así, las Redes Bayesianas representan la incertidumbre con probabilidades, ofreciendo una idea de cuán fuertemente puede ocurrir un evento, usando la comparación como medio de información sobre posibles consecuencias de una situación. Esto permite identificar variables y las relaciones entre ellas en el modelo y la cuantificación de los gráficos con probabilidades numéricas (Chow y Liu, 1968). Debido a las limitaciones de probabilidad para la inferencia de una Red Bayesiana, usualmente no es posible evitar contradicciones entre las diferentes soluciones (ya que se necesita identificar un conjunto de alternativas en el que grupo de expertos tienen opiniones que consideran el problema según el orden de preferencias) y es necesario introducir un primer orden de preferencia que se reordenará después según las relaciones de la Red Bayesiana⁴.

En una Red Bayesiana, cada nodo corresponde a una variable, que a su vez representa una entidad del mundo real. Por tanto, de aquí en adelante hablaremos indistintamente de nodos y variables, y los denotaremos con letras mayúsculas, como X . Utilizaremos la misma letra en minúscula, x , para referirnos a un valor cualquiera de la variable X . Los arcos que unen los nodos indican relaciones de influencia causal.

⁴ Como se verá, en la metodología propuesta, las preferencias de partida salen de un cuestionario DELPHI.

Las Redes Bayesianas tienen varias ventajas:

- Permiten aprender sobre relaciones de dependencia y causalidad.
- Permiten combinar conocimiento con datos.
- Evitan el sobreajuste de los datos.
- Pueden manejar bases de datos incompletos.

El grafo proporciona una forma intuitiva de describir las dependencias del modelo y define una factorización sencilla de la distribución de probabilidad conjunta consiguiendo un modelo manejable que es compatible con las dependencias codificadas. Existen algoritmos eficientes para aprender modelos gráficos probabilísticos a partir de datos, permitiendo así la aplicación automática de esta metodología en problemas complejos.

La ecuación matemática para la elaboración de la Red Bayesiana se obtiene sobre la base de los conocimientos obtenidos a partir de la decisión del grupo de expertos, teniendo en cuenta el conjunto de parámetros, de acuerdo con la distribución de variables (Figura 6). Cada declaración obtenida de los expertos se utiliza para generar indicadores cualitativos dentro de la elaboración de la red.

Figura 6. Relaciones entre los nodos en una Red Bayesiana. Fuente: elaboración propia

Cualquier Red Bayesiana podría descomponerse en tres tipos de conexiones básicas, cada una con propiedades diferentes en el proceso de propagación de probabilidades. En primer lugar, las conexiones seriales o cadenas causales representan un conjunto de variables asociadas

linealmente que denota dependencia entre las variables. En nuestro ejemplo, la variable B depende de A y la variable C depende del valor de B . Así, cuando sabemos algo sobre A podemos modificar nuestra creencia sobre el estado de B y esta información se propagará hasta C . Sin embargo, si encontramos una evidencia sobre B , añadir evidencias sobre C no alterará nuestro conocimiento sobre A y viceversa (Puga et al., 2006). En este caso decimos que A y C son condicionalmente independientes dado B .

Figura 7. Estructura de conexión serial o cadena causal. Fuente: elaboración propia

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. Este hecho marca cómo se establece el flujo de información en una conexión serial.

Figura 8. Flujo de información en una conexión serial. Fuente: elaboración propia

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. Evidencia en una conexión serial. Fuente: elaboración propia

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 causa-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.

En las conexiones divergentes, también conocidas como clasificadores ingenuos de Bayes, tenemos un nodo padre (o clase) que proyecta sus arcos sobre varios hijos, como se representa en la Figura 10a (Herskovits, 1991). Cuando no se conoce el estado de la variable padre existe dependencia entre las variables hijas. Sin embargo, cuando el estado de esta variable se conoce, las evidencias sobre las variables hijas no se propagarán entre ellas. En nuestro ejemplo diremos que A y C son independientes dado B .

Por último, en las conexiones convergentes, llamadas también cabeza a cabeza, varias variables apuntan con sus arcos hacia una variable de convergencia de acuerdo a lo representado en la Figura 10b. En este tipo de conexiones las variables madre son independientes entre sí. Sin embargo, tenemos una evidencia sobre la variable hija, las variables madre se tornarán dependientes (Puga et al., 2006). En nuestro ejemplo diríamos que A y C son condicionalmente dependientes dado B .

Figura 10. Estructura de una conexión divergente (a) y una conexión convergente (b).

Fuente: elaboración propia

Así, la topología o estructura de la red ofrece información sobre las dependencias probabilísticas entre las variables y sus dependencias condicionales dada otra(s) variable(s). Dichas de-

pendencias, simplifican la representación del conocimiento (parámetros) y el razonamiento (propagación de las probabilidades). De esta forma, utilizando estos modelos podemos obtener las relaciones existentes entre las variables y establecer mecanismos de comparación que permiten clasificar y jerarquizar las variables⁵ (Cardozo y Arguello, 2011).

4.2.1. Construcción del modelo bayesiano

La construcción de Redes Bayesianas sigue una estricta metodología. En este apartado se presenta la metodología genérica y en el apartado correspondiente a la propuesta metodológica de la Tesis Doctoral se ahonda en cómo se ha trabajado para esta investigación.

La metodología de construcción se divide en dos grandes tareas: 1) determinar el escenario de trabajo y 2) desarrollar el modelo de Inteligencia Artificial. Esta segunda tarea se descompone a su vez en varias etapas: 2.1. Discretización de variables; 2.2. Aprendizaje Paramétrico; 2.3. Aprendizaje estructural; 2.4. Inferencia y clasificación.

1. Determinación del escenario de trabajo:

Consiste en la revisión del estado del arte para identificar el conjunto de variables de medida de la explotación en terminales marítimas de contenedores. Además, es necesario obtener el valor de las variables para los distintos casos, para cada variable.

El número de valores conforma una tabla de $v \cdot n$ combinaciones, donde v es el número de variables y n es un número de casos evaluados; lo cual constituye una dificultad, cuya solución pudiera consistir en reducir el espacio de representación inicial, de forma tal que si existen variables superfluas, se analice si se mantienen o no, según su importancia desde el punto de vista metodológico.

2. Construcción del modelo de Inteligencia Artificial:

Obtener una Red Bayesiana a partir de datos es un proceso de aprendizaje que se divide en varias etapas que cuyo objetivo es realizar los aprendizajes estructural y paramétrico (Pearl, 1988). A continuación se describe la discretización de las variables, los aprendizajes estructural y paramétrico y la fase de inferencia y clasificación:

⁵ Esta propiedad ha sido empleada para establecer el mecanismo de comparación utilizando el criterio que se ha denominado “*profundidad en la red*” que se explica en el apartado correspondiente a la metodología propuesta en esta Tesis Doctoral.

Una vez seleccionadas las variables de estudio 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, estos están limitados a variables gaussianas y relaciones lineales. Los métodos de discretización se dividen en dos tipos principales: no supervisados y supervisados, lo cual suele ser una opción del software empleado.

Los métodos de no supervisados no consideran la variable clase, así que los atributos continuos son discretizados independientemente. El método más simple es dividir el rango de valores cada atributo $[X_{\min}; X_{\max}]$ en k intervalos, donde k es dado por el usuario u obtenido usando una cierta medida de información sobre los valores de los atributos.

Los métodos supervisados consideran la variable clase, es decir los puntos de división para formar rangos en cada atributo son seleccionados en función del valor de la clase. El problema de encontrar el número óptimo de intervalos y de los límites correspondientes se puede considerar como un problema de búsqueda. Es decir, se pueden generar todos los puntos posibles de división para formar intervalos sobre la gama de valores de cada atributo (donde hay un cambio en la clase), y estimar el error de clasificación para cada partición posible (usando por ejemplo, cross validation). Desafortunadamente, la generación y la prueba de todas las posibles particiones es impráctica, por lo que normalmente se realiza una búsqueda heurística. El enfoque supervisado se aplica directamente al caso de los clasificadores bayesianos. Por ejemplo, para un atributo continuo A , se comienza con un número inicial de particiones. Entonces se hace una búsqueda iterativa para encontrar una mejor partición, uniendo o particionando intervalos, y probando la exactitud del clasificador después de cada operación. Esta es básicamente una búsqueda *hill-climbing*, que se detiene cuando la exactitud ya no puede ser mejorada. Para el caso general de una Red Bayesiana, existe un método para la discretización de atributos continuos, mientras se aprende la estructura de la Red Bayesiana, considerando el número de intervalos de una variable con respecto a sus vecinos en la red. Para una estructura dada, un procedimiento de búsqueda local encuentra la discretización de una variable que reduce al mínimo la longitud de la descripción referente a los nodos adyacentes en la red, y éste se repite en forma iterativa para cada una de las variables continuas.

Para la construcción de la red se utiliza en esta Tesis Doctoral el software Elvira, específico para trabajar con Redes Bayesianas (Elvira Consortium, 2002). El programa Elvira⁶ cuenta con un formato propio para la codificación de los modelos, un lector-intérprete para los modelos codificados, una interfaz gráfica para la construcción de redes, con opciones específicas para modelos canónicos, algoritmos exactos y aproximados (estocásticos) de razonamiento tanto para variables discretas como continuas, métodos de explicación del razonamiento, algoritmos de toma de decisiones, aprendizaje de modelos a partir de bases de datos, fusión de redes, etc.

La construcción propiamente dicha de Redes Bayesianas a partir de los datos obtenidos discretizados es un proceso de aprendizaje que se divide en dos aspectos:

- Aprendizaje estructural: Consiste en obtener la estructura de la Red Bayesiana a partir de la base de datos, es decir, las relaciones de dependencia y/o independencia entre las variables involucradas. De acuerdo al tipo de estructura, podemos dividir los métodos de aprendizaje estructural en:

- Aprendizaje de árboles⁷.
- Aprendizaje de poliárboles⁸.

⁶ Elvira es un entorno de investigación de métodos y algoritmos de razonamiento probabilístico. Fue desarrollado por las universidades españolas: Granada, Almería, País Vasco y UNED.

⁷ En este método de aprendizaje se trata de aproximar una distribución de probabilidad, por medio del producto de probabilidades de segundo orden. La resolución de este tipo de problemas de aprendizaje se plantea como un problema de optimización, es decir, obtener una estructura de árbol que se aproxime a una distribución basada en la diferencia de una distribución real y aproximada.

El algoritmo para determinar árbol Bayesiano óptimo a partir de datos es el siguiente:

1. Calcular la información mutua entre todos los pares de variables $(n(n - 1)/2)$.
2. Ordenar las informaciones mutuas de mayor a menor.
3. Seleccionar la rama de mayor valor como árbol inicial.
4. Agregar la siguiente rama mientras no forme un ciclo, si es así, desechar.
5. Repetir (4) hasta que se cubran todas las variables $n - 1$ ramas.

⁸ Consiste en encontrar las relaciones de dependencia entre las variables, de forma que se pueda determinar la topología o estructura de la Red Bayesiana. Se basa en el uso de pruebas de tres variables o comúnmente llamadas tripletas. Con base en el algoritmo de árboles, se determina la dirección de los arcos mediante el uso de pruebas de dependencia.

Los pasos del algoritmo son:

1. Mantener el esqueleto usando el algoritmo de árboles.
2. Recorrer la red hasta encontrar una tripeleta de nuevo, que sean convergentes (la variable a donde apuntan los arcos se conoce como nodo multipadre).
3. Del nodo multipadre se determinan las direcciones de otros arcos, esto mediante la prueba de dependencia en tripletas.
4. Repetir los pasos anteriores hasta que no hayan más direcciones que descubrir.

Para el caso más general, que es el de redes multiconectadas, existen dos clases de métodos específicos:

- Métodos basados en medidas y búsqueda.
- Métodos basados en relaciones de dependencia.

Otra alternativa es combinar conocimiento subjetivo del experto con aprendizaje. Para ello se parte de la estructura dada por el experto, la cual se valida y mejora utilizando datos estadísticos.

- Aprendizaje paramétrico: se fundamenta en obtener los parámetros asociados a la estructura de la Red Bayesiana resultante del aprendizaje estructural, la cual se denomina diagrama de influencia. Es decir, lo que se pretende es encontrar las probabilidades a priori de los nodos raíz y las probabilidades condicionales de las demás variables dados sus padres, de acuerdo con la información disponible (Larrañaga et al., 1996). Si se conocen todas las variables, es fácil obtener las probabilidades requeridas. Las probabilidades previas corresponden a las marginales de los nodos raíz, y las condicionales se obtienen de las conjuntas de cada nodo con su(s) padre(s). Para que se actualicen las probabilidades con cada caso observado, éstas se pueden representar como razones enteras, y actualizarse con cada observación (Herkovits, 1991).

Dado el modelo de red construido, la estructura permite capturar las relaciones de dependencia que existe entre los atributos de los datos que se estudien, describiendo la distribución de probabilidad que administra un conjunto de variables especificando los cálculos de independencia condicional junto con probabilidades condicionales. Así, las redes permiten especificar relaciones de independencia entre conjuntos de variables y con ello se puede hacer *Inferencia Bayesiana*. Es decir, es posible estimar la probabilidad posterior de las variables no conocidas, en base a las variables conocidas y autocompletar datos faltantes.

La incertidumbre es natural en el proceso de razonamiento donde se pueden establecer reglas para inferir de manera deductiva una proposición determinada que puede ser verdadera o falsa, según sea el límite de esta estimación. Dentro de los métodos de razonamiento se encuentran los modelos bayesianos, que simulan diferentes condiciones de incertidumbre cuando no se conoce si es verdadera o falsa la hipótesis enunciada en un rango de variación. Todos los modelos bayesianos tienen en común la asignación de la probabilidad como medida de creencia de una hipótesis, así es que, la inferencia es un proceso de reajuste de medidas de

creencia al conocerse nuevos axiomas. Cuando se utilizan evidencias y observaciones para establecer que una suposición sea cierta, es lo que se denomina como *Inferencia Bayesiana*. La *Inferencia Bayesiana* observa la evidencia y calcula un valor estimado según el grado de creencia planteado en la hipótesis. Esto implica que al tener mayor cantidad de datos disponibles se podrá obtener resultados más satisfactorios. La ventaja fundamental del uso de la *Inferencia Bayesiana* radica en la utilidad que se le da para la toma de decisiones, actualmente su uso es frecuente porque se obtienen resultados más acertados en el contexto de parámetros desconocidos (Zellner, 1987).

La *Inferencia Bayesiana* es una técnica estadística adecuada para reunir las opiniones de expertos en el análisis de datos. El mecanismo de inferencia sobre Redes Bayesianas permite utilizarlas para construir clasificadores⁹ y para evaluar la robustez del modelo. Para esto se debe crear una Red Bayesiana en la que las variables se interrelacionen en el grafo. La clase pertenecerá a la variable desconocida, objetivo de la inferencia. Proporcionada una instancia cualquiera para la que se conozcan todos sus atributos, la clasificación se verificará infiriendo sobre el grafo la probabilidad posterior de cada uno de los valores de la clase, y eligiendo aquel valor que maximice dicha probabilidad (Fernández, 2004).

4.2.2. Algoritmo empleado para la construcción de la Red Bayesiana

Uno de los principales problemas encontrados en este tipo de métodos es la cantidad tan grande de posibles estructuras; es por ello que se han desarrollado diferentes heurísticas para no explorar todo el espacio de búsqueda, entre ellos figuran los algoritmos genéticos (Larragaña, 1996) y algoritmos “greedy” como el K2 (Cooper y Herskovits, 1992).

⁹ Existe además la posibilidad de combinar la inferencia con las características que poseen los métodos bayesianos en tareas de aprendizaje. Estos métodos son robustos al posible ruido presente en los ejemplos de entrenamiento y a la posibilidad de tener entre esos ejemplos de entrenamiento datos incompletos o posiblemente erróneos. Así, es posible inferir el valor de alguna variable dando los valores observados de otras (Pearl 1988). Como se trabaja en este caso con variables aleatorias no se inferirían valores concretos, sino más bien funciones de distribución para esa variable, que señalarían la probabilidad de que esa variable tome cada uno de los posibles valores partiendo de los valores observados de otras variables (Felgaer, 2004). Este método se base en las probabilidades a posteriori $P(X|Y) = y$ de un conjunto de variables X después de obtener un conjunto de observaciones $Y = y_i$ donde Y es la lista de variables observadas e y_i es un valor particular tomado por ella.

Si se tienen datos de un suceso anterior y este suceso se está representando en la red como un nodo padre la red puede conjeturar cuáles serán sus efectos. Para lograr esto se debe conservar la información en el nodo correspondiente y difundir esta información hacia el resto de los nodos (Bockhorst et al., 2003). Esta capacidad podría ser empleada en futuras investigaciones que evalúen nuevas instalaciones logísticas que exijan la incorporación de nuevos factores evitando la necesidad de repetir el cuestionario DELPHI para el nuevo caso.

El mejor modelo es aquél que es el más probable. La teoría bayesiana nos proporciona herramientas para calcular la probabilidad de un modelo y posteriormente comparar las probabilidades de varios modelos, detectando cual es el más probable.

Si bien es tan grande (más bien astronómica) la cantidad de modelos existentes que un recorrido exhaustivo por todos los modelos buscando aquél más probable llega a ser una utopía, por ello se impone una búsqueda heurística que nos lleve a encontrar datos válidos en un tiempo razonable.

Un método sencillo consistiría en escoger un modelo aleatoriamente, obtener su ML (maximum likelihood). Se escoge otro modelo de forma aleatoria, se comparan sus ML y nos quedamos con aquél que tenga mejor valor, y así sucesivamente. Como no tiene punto final deberemos indicarle por ejemplo que pasado un tiempo finalice, o cuando llegue a un valor umbral mínimo de probabilidad (Nilsson, 1998).

Un método más sofisticado es el que se describe a continuación, denominado algoritmo *K2*. El algoritmo *K2* está basado en la optimización de una medida. Esa medida se usa para explorar, mediante el algoritmo, el espacio de búsqueda formado por todas las redes que contienen las variables de la base de datos. Se parte de una red inicial y ésta se va modificando (añadiendo arcos, borrándolos o cambiándolos de dirección) obteniendo una nueva red con mejor medida (Cooper and Herskovits, 1992). En concreto, el algoritmo *K2* para una red B_S y una base de datos D , se puede escribir de la siguiente forma:

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

Ecuación 2. Algoritmo *K2* usado para la construcción de la Red Bayesiana

donde N_{ijk} es el número de casos en D para los cuales X_i ($i = 1, \dots, n$) toma su k -ésimo valor cuando Pa_i (padres de X_i en B_S) toman en su j -ésima configuración, donde q_i es el número de configuraciones posibles del conjunto de padres y r_i es el número de valores que puede tomar la variable X_i .

K2 comienza asumiendo que un nodo no tiene padres, por lo que todas las estructuras son igualmente probables al inicio. Para cada nodo, el algoritmo *K2* busca el conjunto de padres que maximiza:

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

Ecuación 3. Criterio de aprendizaje estructural del algoritmo K2 utilizado

En cada paso, añade de manera incremental aquel nodo padre cuya inclusión más incrementa $g(i, Pa_i)$ y para en el instante en que la inclusión de un padre simple no incrementa este valor.

Este algoritmo fue desarrollado por Cooper y Herskovits (1992). Como vemos, se trata de un algoritmo de búsquedas que optimiza la probabilidad de la red dada la base de datos. En realidad, lo que hace este algoritmo es encontrar el conjunto de padres más probables, utilizando la métrica Bayesiana, que mide precisamente la probabilidad de la estructura dados los datos. Su principal ventaja es que la forma de ordenar la red reduce considerablemente el espacio de búsqueda respecto a otros algoritmos, ya que el ordenamiento hace que un nodo que está después en el ordenamiento que otro no pueda ser su padre, permitiendo encontrar una estructura de la red en un tiempo de cálculo razonable. En concreto, en esta investigación se emplea la implementación del algoritmo K2 desarrollada en el programa Elvira (Elvira Consortium, 2002).

4.3. Análisis Multicriterio

Gran parte de los problemas de toma de decisiones implican la optimización simultánea de varios objetivos que generalmente presentan conflictos entre ellos. Es decir, la mejora en uno conduce a un deterioro en el otro.

En los problemas de optimización de un solo objetivo el resultado óptimo deseado está claramente definido. Sin embargo, esta condición no se cumple para los problemas de optimización multiobjetivo donde, en vez de un único óptimo, contamos con todo un conjunto de soluciones de compromiso (Hwang et al., 1979).

En un problema de optimización se trata de encontrar una solución que represente el valor óptimo para una función objetivo (Fan et al., 2010). En el caso más sencillo se tiene un único objetivo, que estará representado por una función del tipo $f: M \rightarrow N$, donde $M \subset \mathbb{R}$ y $N \subset \mathbb{R}$. Tanto el dominio como la imagen de la función son números reales (escalares) y el valor óptimo corresponde a un mínimo o a un máximo de la función a optimizar.

Pero en ciencias e ingeniería se dan, en bastantes ocasiones, problemas que requieren la optimización simultánea de más de un objetivo (optimización multiobjetivo). Habrá que optimizar por tanto una función de la forma $f: S \rightarrow T$, donde $S \subset \mathbb{R}^n$ y $T \subset \mathbb{R}^k$. Pero el problema está en que normalmente no existe un elemento de S que produzca un óptimo de forma simultánea para cada uno de los k objetivos que componen f . Esto se debe a la existencia de conflictos entre objetivos, que harán que la mejora de uno de ellos dé lugar a un empeoramiento de algún otro. Habrá que llegar por tanto a una situación de compromiso en la que todos los objetivos sean satisfechos en un grado aceptable, desde el punto de vista de diseño (si bien, se pueden establecer umbrales inaceptables para alguno de los objetivos, de forma que se descarten las soluciones que estén por debajo de una calidad mínima para el mismo).

A diferencia de los problemas de optimización con un único objetivo, el concepto de óptimo es ahora relativo y es necesario decidir de alguna forma cuál es la mejor solución (o cuáles son las mejores soluciones) al problema.

En términos matemáticos, el problema de optimización multiobjetivo, puede establecerse de la siguiente forma:

Encontrar un vector $x^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$, que satisfaga las m restricciones $g_i(x) \geq 0$; $i = 1, 2, \dots, m$ y las p restricciones $h_i(x) = 0$; $i = 1, 2, \dots, p$ y optimice la función vectorial $f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]^T$, donde $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ es el vector de variables de decisión.

En otras palabras, se desea determinar la solución particular $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$, del conjunto S formado por todos los valores que satisfacen las m restricciones $g_i(x) \geq 0$; $i = 1, 2, \dots, m$ y las p restricciones $h_i(x) = 0$; $i = 1, 2, \dots, p$, que dé lugar a los valores óptimos para todas las funciones objetivo. Pero como ya se ha comentado, no existe normalmente una solución que optimice de forma simultánea todas las funciones objetivo.

Para tratar el problema comentado del conflicto entre objetivos se han utilizado diversos métodos (Mauttone y Urquhart, 2005):

- Métodos basados en el concepto de eficiencia de Pareto.

Sea P un problema de optimización multiobjetivo, se dice que una solución S_1 es un óptimo de Pareto cuando no existe otra solución S_2 tal que mejore en un objetivo sin empeorar al menos uno de los demás objetivos (Greenwald y Stiglitz, 1986). Es decir,

una solución vectorial x^* se dice Pareto-óptima si y sólo si no existe otro vector x tal que $v = f(x) = (v_1, \dots, v_k)$ domine a $u = f(x^*) = (u_1, \dots, u_k)$, donde la dominancia se entiende como sigue: dado un vector $u = (u_1, \dots, u_k)$, se dice que domina a otro vector $v = (v_1, \dots, v_k)$ si y sólo si $\forall i \in \{1, \dots, k\}, u_i \leq v_i$ y $\exists i_0 \in \{1, \dots, k\} \mid u_{i_0} < v_{i_0}$.

➤ Métodos basados en la asignación de prioridades.

Estos métodos tienen en común que establecen unas prioridades entre los distintos objetivos, teniéndose en cuenta su importancia relativa durante el proceso de optimización.

Consideremos un problema decisonal en el que existen q metas. La estructura de la meta genérica i -ésima es la siguiente (García-Aguado, 2003):

$$(g_i): f_i(x) + n_i - p_i = t_i$$

Ecuación 4. Estructura de la meta genérica i -ésima en un problema de optimización multiobjetivo con solución mediante asignación de prioridades

donde $f_i(x)$ representa la expresión matemática del objetivo i -ésimo (es decir, una función del vector x de las variables de decisión), n_i y p_i son respectivamente las variables de desviación negativa y positiva y t_i es el nivel de prioridad asociado a dicho objetivo. La variable de desviación negativa cuantifica la falta de logro de una meta con respecto a su nivel de prioridad, mientras que la variable de desviación positiva juega el papel opuesto, es decir, la medición del exceso de logro de una meta con respecto a su nivel de aspiración.

Una variable de desviación se dice que es no deseada cuando al decisor le conviene que la variable en cuestión alcance su valor más pequeño. Existen tres posibles situaciones:

- a) La meta deriva de un atributo del tipo “más del atributo, mejor” (por ejemplo, satisfacer $f_i(x) \geq t_i$). En estos casos, la variable no deseada (a minimizar), será la variable de desviación negativa (cuantificación de la falta de logro).
- b) La meta deriva de un atributo del tipo menos del atributo mejor (por ejemplo, satisfacer $f_i(x) \leq t_i$). En estos casos, la variable no deseada

(a minimizar), será la variable de desviación positiva (cuantificación del exceso de logro).

- c) La meta deriva de un atributo del que se quiere alcanzar exactamente su nivel de aspiración (por ejemplo, satisfacer $f_i(x) = t_i$). En estos casos, tanto la variable de desviación negativa como la positiva son variables no deseadas y por tanto variables a minimizar.

El propósito general consiste en minimizar una cierta función de las variables de desviación no deseadas. Esta función recibe el nombre de función de logro, $\min g(p_i, n_i)$ (Ignizio y Cavalier, 1994).

➤ Métodos basados en la combinación de objetivos.

Dentro de estos métodos se puede mencionar el método de la suma lineal ponderada (Scoring), en el que se optimizará el valor obtenido mediante la suma de los valores correspondientes a los distintos objetivos, multiplicados cada uno por un coeficiente de peso. Estos coeficientes de peso establecen la importancia relativa de cada objetivo. El problema de optimización multiobjetivo se transforma así en otro de optimización escalar, que para el caso de la minimización será de la forma:

$$\min \sum_{i=1}^k \omega_i f_i(x)$$

Ecuación 5. Método multicriterio de suma lineal ponderada (Scoring) para el caso de minimización

y para el caso de la maximización responde a la expresión:

$$\max \sum_{i=1}^k \omega_i f_i(x)$$

Ecuación 6. Método multicriterio de suma lineal ponderada (Scoring) para el caso de maximización

donde $\omega_i \geq 0$ es el coeficiente de peso correspondiente al objetivo i .

Existen variantes del método anterior, como el método de la programación por metas, en el que se establece una meta para cada objetivo y lo que se suma ahora (multipli-

cado por el correspondiente coeficiente) es la distancia de cada objetivo a su meta. Para un caso de minimización sería:

$$\min \sum_{i=1}^k \omega_i |f_i(x) - M_i|$$

Ecuación 7. Método multicriterio de programación por metas para el caso de minimización

o para el caso de la maximización:

$$\max \sum_{i=1}^k \omega_i |f_i(x) - M_i|$$

Ecuación 8. Método multicriterio de programación por metas para el caso de maximización

donde M_i representa la meta del i-ésimo objetivo.

La optimización de dicha función ponderada y agregada genera un elemento del conjunto eficiente. Por medio de la parametrización de los pesos asociados a los objetivos se va aproximando el conjunto eficiente o conjunto de soluciones óptimas (Romero, 1996).

4.4. Sistemas de Información Geográfica

En la década de los setenta, con el desarrollo de la tecnología informática, aparecieron una serie de programas cuya finalidad era gestionar datos espaciales georreferenciados. En los primeros momentos se necesitaba un potente instrumental para poder trabajar con ellos, pero poco a poco se fueron desarrollando mejoras técnicas que han ido simplificando y popularizando la utilización de este tipo de programas (Universidad de Cádiz, 2013).

Es difícil definir el término Sistema de Información Geográfica ya que engloba la integración de áreas muy diversas. Por esto no existe una única definición de Sistema de Información Geográfica totalmente consensuada (de Mers, 2008). Suele definirse como *“una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica”* (NCGIA, 1990).

También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información (Bolstad, 2005).

Un sistema de Información Geográfica funciona como una base de datos con información geográfica que se encuentra asociada por un identificador de un mapa digital (Bosque, 1997). De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía (Clarke, 1999). El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma (Moreno et al., 2008).

Se presentan a continuación las características de los Sistemas de Información Geográfica que los convierten en herramientas indispensables frente a otros métodos tradicionales o manuales (Cowen, 1990; Conesa, 1996; Gutiérrez y Gould, 1994; Chang, 2006):

- Se trata de un sistema de almacenamiento y visualización de la realidad geográfica eficiente e interactivo que trabaja con información exacta, centralizada y, sobre todo, actualizada ya que permite la posterior incorporación de información complementaria que enriquece constantemente la base de datos original.
- El formato digital de los datos permite trabajar con formas compactas que nada tienen que ver con los mapas de papel o las tradicionales tablas de información.
- El tratamiento y el análisis de la información se realiza en cantidades ingentes. Estas herramientas permiten no sólo trabajar con grandes volúmenes de datos, sino que además permiten almacenarlos física y completamente, y en varios niveles, por ejemplo, público e institucional. Los datos son almacenados y representados de manera independiente.
- También permiten trabajar e integrar información de distintas fuentes y escalas, y datos tanto espaciales como no-espaciales. Además, todos estos datos pueden ser analizados a la vez, incluso repetidamente, y de una forma rápida, racional y fácilmente inteligible para el usuario, permitiendo así una evaluación ágil y sencilla.

- No sólo pueden integrarse conjuntos de datos diferentes, sino que también pueden ser integrados varios procedimientos distintos. Esto no sería posible mediante ningún método manual. Además, evita actividades redundantes.
- Igual de rápido que es el procesamiento de la información, lo es la obtención de productos cartográficos.
- Los productos o resultados cartográficos que se obtienen tras el análisis de los datos espaciales con un Sistema de Información Geográfica se caracterizan principalmente por su calidad y su variedad. Además, si se elige el software adecuado, son resultados obtenidos con una inversión mínima de tiempo y de dinero.
- También a bajo coste y a una mayor velocidad puede realizarse el mantenimiento y la recuperación de datos.
- El carácter multidisciplinar de estas aplicaciones permite elaborar modelos de desarrollo de gran variedad, enriqueciendo así la gestión.

Los datos espaciales en un Sistema de Información Geográfica pueden ser representados a través de dos formatos o sistemas espaciales: vectorial y ráster (de Mers, 2002). Son dos formatos muy diferentes, que se distinguen por su manera de almacenar los objetos geográficos (la base de datos geográfica), su manera de almacenar los atributos de estos objetos (la información temática) y, en último lugar, por su apariencia. Los Sistema de Información Geográfica vectoriales son más populares en el mercado. No obstante, los Sistema de Información Geográfica ráster son muy utilizados en estudios que requieran la generación de capas continuas, necesarias en fenómenos no discretos; también en estudios medioambientales donde no se requiere una excesiva precisión espacial (Sastre, 2010).

El desarrollo de los Sistema de Información Geográfica ha corrido paralelo al progreso del hardware y del software informático. Los avances en la tecnología de los ordenadores se han visto correspondidos con unos Sistemas de Información Geográfica más potentes y fáciles de manejar. De esta forma, los sistemas de información geográfica se han convertido en una herramienta para el análisis geográfico de gran difusión (Bosque y García, 2000). La causa principal de esto reside en la multitud de actividades en las que pueden ser útiles, que suelen clasificarse en dos grandes grupos, que se asocian a las fases de la planificación territorial: 1) gestión y descripción del territorio: ¿dónde están las “cosas”? (primera fase de la planificación territorial: establecimiento de los objetivos territoriales a alcanzar) y 2) ordenación y planificación del

territorio: ¿dónde deben estar las “cosas”? (segunda fase: ordenación del territorio). No obstante, es evidente que los resultados alcanzados en la segunda fase pueden afectar a la definición de los objetivos de la primera, de modo que existe algún tipo de ciclo de “realimentación” en todo el proceso. Esta investigación, al tratarse de un problema de asignación de la posición espacial “óptima” de una instalación, se centra en la segunda fase. Por simplicidad, se supone nulo el efecto sobre la primera fase.

Como forma de trabajo con el software de información geográfica para esta Tesis Doctoral se ha seleccionado el Método de McHarg (McHarg y Mumford, 1969), cuyos principios se desarrollan a continuación.

Este método, precursor de la planificación ecológica, mediante el establecimiento de mapas de aptitud del territorio para los diversos usos se trabaja a través de la elaboración de mapas de impacto obtenidos matricialmente. Se realiza una superposición de los mismos en los que se señalarán con gradaciones de color los impactos indeseables.

Mc Harg propone un proceso ecológico sistemático de planificación en base a una serie de cualidades del territorio (Cualidades intrínsecas, Productividad, Contribución al equilibrio ecológico y Riesgos de su uso impropio). Estos valores se ordenan según una jerarquía que toma en cuenta lugar y tiempo, la que debe ser considerada al evaluar los impactos. El método parte elaborando una serie de mapas de carácter ambiental sobre material transparente, que suponen la descripción ecológica del lugar, tratando de evaluar las posibilidades de ordenación o planificación y las consecuencias de éstas sobre el medio ambiente, preocupándose especialmente de que los procesos biológicos consten como criterios restrictivos y orientadores en la planificación territorial. El inventario mapificado incluye los siguientes factores: clima, geología histórica, fisiografía, hidrología, suelos, flora, fauna y uso actual del suelo. Seguidamente, se interpretan los datos del inventario en relación con las actividades o acciones objeto de localización y se traduce en mapas específicos para cada una de las actividades, que son fundamentalmente agricultura, recreo, silvicultura y uso urbano, atribuyendo valores a los procesos. Comparando los usos objeto de localización entre sí, mediante la superposición de diferentes mapas, se obtiene una matriz de incompatibilidades y se sintetizan estos datos en un mapa de capacidad o adecuación. También realiza paralelamente un inventario económico y de visualización del paisaje que, junto con la matriz de adecuación, permite a la autoridad competente instrumentar la planificación. Naturalmente, hoy se dispone de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), consistentes en “capas” de información digital georeferenciada, lo que facilita mucho el uso de esta metodología.

El segundo paso consiste en la elaboración de Listas de Control, que comprenden unos atributos (en total, McHarg consideraba 30, divididos en: Clima, Fisiografía, Suelos, Vida silvestre, Geología, Hidrología, Vegetación y Uso de la Tierra). Los factores más relevantes son seleccionados conforme al problema considerado y se procede a calificar los atributos de manera ordinal (p. ej., Contaminación del Aire: alta, media, baja, muy baja) lo que se expresaba en los mapas originales mediante distintos tonos de gris (los SIG ofrecen mayor flexibilidad). También se confeccionan mapas que suman dos o más factores. El método de McHarg para la valoración del impacto se basa en la utilización de transparencias sobre las cuales dibujaban con tramas de distinta tonalidad, las limitaciones de los principales rasgos del territorio para un uso dado. Estas, posteriormente, eran superpuestas determinando así las zonas más oscuras como las más sensibles a dicha actividad. También aquí la digitalización de la información amplía el abanico de posibilidades y hace más sencilla la tarea (como en el tratamiento matemático de las imágenes satelitales). El resultado final son series de mapas que indican la adecuación del terreno a distintos usos (p. ej., conservación, recreación, residencial, comercial, industrial, etc.). De ahí que el método se adecúe muy bien a estudios de ordenación del territorio. Se considera que este método es relativamente económico y rápido, y que facilita parcialmente la detección de efectos indirectos.

5. METODOLOGÍA DE LA TESIS DOCTORAL

Para la consecución del objetivo principal de esta Tesis Doctoral, se ha diseñado una metodología *ad hoc* que combina las técnicas presentadas en el apartado anterior: DELPHI, Redes Bayesianas, Análisis Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica.

Todas ellas se aplican siguiendo los esquemas metodológicos generales que ya se han anticipado en el apartado anterior, si bien se han implementado algunas particularidades que se explican y desarrollan a continuación.

Esta metodología consta de 3 fases, cada una de las cuales está constituida por varias tareas de acuerdo al esquema presentado en la Figura 11: 1) la primera fase consiste en la definición del escenario de trabajo y la obtención de información; 2) la segunda fase es la generación y análisis de una base de datos geográficos y la obtención de los pesos de los factores de decisión a través de un cuestionario DELPHI; 3) la tercera fase consiste en la generación de una herramienta de evaluación asistida mediante el uso de Redes Bayesianas.

De este diagrama surgen a su vez dos subdiagramas, los cuales se corresponden respectivamente con las tareas señaladas con los símbolos (*) y (**), concernientes a los esquemas metodológicos del cuestionario DELPHI y la construcción de la Red Bayesiana empleada para establecer las relaciones entre las variables que influyen la localización de puertos secos. Estos subdiagramas se muestran en la Figura 12 y la Figura 13 respectivamente.

Figura 11. Esquema metodológico de la investigación. Fuente: elaboración propia

Figura 12. Esquema metodológico de la metodología DELPHI. Fuente: elaboración propia

Figura 13. Esquema metodológico del Análisis de la relación entre las variables mediante Redes Bayesianas. Fuente: elaboración propia

A continuación se explica y se desarrollan las fases y tareas de las cuales se compone la metodología empleada en la Tesis Doctoral:

FASE 1: DEFINICIÓN DEL ESCENARIO DE TRABAJO Y OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN

- Revisión bibliográfica: diagnosis, estado del arte y definición de los factores y las variables que determinan la localización de los puertos secos

Se realiza una primera revisión bibliográfica cuyos objetivos son: 1) identificar las principales herramientas y metodologías empleadas en planificación; 2) decidir cuáles son de aplicación al problema que se pretende resolver en esta Tesis Doctoral; y 3) conocer cómo pueden relacionarse entre sí para generar un modelo que ayude a planificar la localización de puertos secos, mediante el diseño de un sistema de evaluación que sirva como base teórica para el desarrollo de un futuro método de ayuda a la toma de decisiones.

Posteriormente, se realiza una segunda revisión bibliográfica en los siguientes ámbitos: 1) logística, transporte intermodal y comodalidad, 2) puertos secos y 3) teorías de localización industrial. En esta segunda revisión se identifican las características de los puertos secos y se valoran los condicionantes a que se enfrenta la planificación de su ubicación. Con estos condicionantes y entendiendo cómo se suele establecer la ubicación de otras instalaciones industriales, gracias al estudio de los diferentes avances realizados en el campo de la localización industrial, es posible identificar los factores y las variables relevantes que tienen que ser tenidas en cuenta en el modelo de evaluación. Para poder ordenar la información se genera una estructura anidada en la que se establece la siguiente jerarquía: 1) un conjunto de categorías compuestas por varios factores relacionados entre sí; 2) un conjunto de factores dentro de cada categoría. Cada uno de ellos está influenciado por varias variables; 3) un conjunto de variables de las cuales depende cada factor. Esta estructura se comprende mejor en el esquema presentado en la Figura 14. Huelga decir que el número de factores que componen cada categoría y el de variables de las que depende cada factor es diferente.

Figura 14. Estructura anidada para organizar las categorías, los factores y las variables

➤ Obtención de la información geográfica

La segunda tarea de la primera fase consiste en la obtención de cartografías y bases de datos de cada una de las variables de estudio. Para ello, ha sido necesario acudir a diversos organismos nacionales e internacionales.

Estas mediciones se toman para cada uno de los puertos secos.

FASE 2: HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN BASADA EN METODOLOGÍA DELPHI Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

➤ Generación de la cartografía y obtención de los Criteria Assessment Score

Se genera la cartografía con toda la información geográfica recabada en la fase anterior, obteniendo una base de datos jerárquica de acuerdo a la estructura presentada en la Figura 14. Las consultas a la base de datos se realizan a través del lenguaje de manipulación de datos SQL incorporado en el software especializado de Sistemas de Información Geográfica que, en este caso es ArcGIS 10. Este software permite la identificación e inventario de las variables que influyen en la localización de los puertos secos mediante la consulta a diferentes cartografías digitalizadas. El procedimiento comienza con la elaboración de mapas para cada uno de los parámetros a evaluar de forma aislada y la interpretación los datos en relación a la actividad objeto de localización.

Accediendo a esta base de datos, puede establecerse el valor de cada variable para cada uno de los puntos del territorio en los que existe un puerto seco. Esta selección se automatiza para cada uno de los casos gracias a las funciones de ArcGIS 10: distancias a determinados elemen-

tos, número de elementos a una distancia determinada, población de los municipios más cercanos, etc. A cada valor obtenido se le otorga una calificación, la cual se denomina *Measured Criteria Assessment Score* ($MCAS_{ik}$). El conjunto de $MCAS_{ik}$ se agrupa en un vector de calificaciones con la siguiente forma:

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

Ecuación 9. Vector de calificaciones (*Criteria Assessment Score*)

Sin embargo, los $f_k(x_j^i)$ tienen unidades diferentes correspondientes a cada una de las variables y además unas son de tipo beneficio (un valor más alto es mejor) y otras de tipo coste (un valor más bajo es mejor). Por ello, para conseguir un conjunto de valores comparables es necesario normalizar las calificaciones en una escala de 0 a 10, siendo 0 el peor resultado y 10 el mejor y uniformizar el tipo de variables convirtiendo todas en tipo beneficio. Al valor obtenido se le denomina *Standardised Criteria Assessment Score* ($SCAS_{ik}$).

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

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

Ecuación 10. Forma general de un spline polinómico de grado n

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:

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

Ecuación 11. Condiciones de los extremos del intervalo para el caso de interpolación lineal

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 anteriores. Ésta consiste en anular la derivada primera en el extremo mayor del intervalo, para que el valor de P' sea máximo en el punto:

$$\left\{ \begin{array}{l} P\{\max[f_k(x_j^i)]\} = 10 \\ P\{\min[f_k(x_j^i)]\} = 0 \\ P'\{\max[f_k(x_j^i)]\} = 0 \text{ para } x_j^i \in [m, n] \end{array} \right\}$$

Ecuación 12. Condiciones de los extremos del intervalo para el caso de interpolación cuadrática

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:

$$\left\{ \begin{array}{l} P\{\max[f_k(x_j^i)]\} = 10 \\ P\{\min[f_k(x_j^i)]\} = 0 \\ P''\{f_k(x_j^i)\} = 0 \text{ en los extremos del intervalo } [m, n] \end{array} \right\}$$

Ecuación 13. Condiciones de los extremos del intervalo para el caso de interpolación cúbica

Con ello, se obtienen $f'_k = f'(x_1^i, x_2^i, \dots, x_j^i) = f'_k(x_j^i) = SCAS_{ik}$. El tipo de interpolación se decide seleccionando aquel que minimiza la diferencia entre el vector de $MCAS_{ik}$ de partida y el vector de $SCAS_{ik}$ obtenido de su aplicación.

➤ Cuestionario DELPHI y obtención de los pesos de ponderación de los factores

La obtención de los pesos de ponderación de los factores 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.

Para la aplicación del método DELPHI se sigue una metodología que si bien sigue la estructura de un DELPHI general, presenta algunas pequeñas variantes para adaptarlo al trabajo desarrollado en esta Tesis Doctoral. Así, aunque la literatura científica suele hablar de 4 fases (Definición de objetivos, Selección de expertos, Elaboración y lanzamiento de los cuestionarios, Explotación de resultados), el proceso seguido en la investigación se desarrolla a continuación:

1. Formulación del problema. En esta primera fase se plantea la formulación del problema y un objetivo general que está compuesto por el objetivo del estudio, el marco espacial de referencia y el horizonte temporal para el estudio.
2. Redacción del cuestionario. Se redacta un cuestionario para encuestar a los expertos. Las preguntas se plantean de forma que son claras, concisas y rápidas de contestar, haciendo que los expertos se vean predispuestos a responder sin un esfuerzo elevado. Es importante también que haya un espacio para que los expertos expresen su opinión con cierta flexibilidad. Para ello, se ha habilitado un espacio para sus observaciones al final del cuestionario. El *feedback* de los expertos resulta fundamental para extraer posteriormente las conclusiones del estudio.
3. Selección del panel de expertos. Esta fase presenta dos dimensiones: a. Dimensión cualitativa: se seleccionan en función del objetivo prefijado y atendiendo a criterios de experiencia posición, responsabilidad, acceso a la información y disponibilidad. b. Dimensión Cuantitativa: elección del tamaño de la muestra en función de los recursos medios y tiempo disponible. Para no condicionar la calidad de los resultados por el dimensionamiento, se decidió acudir a más expertos de los que son necesarios en el estudio, en previsión de que alguno de los expertos pudiera no finalizar el proceso. Además, el cuestionario se ha realizado de manera anónima (por correo electrónico) para evitar los efectos de “líderes”.
4. Primer lanzamiento de los cuestionarios. En esta tarea se mandan cuestionarios y, mientras se esperan las respuestas, se preparan los estadillos para rellenar con la información recabada.
5. Explotación de los resultados del primer lanzamiento. Consiste en el análisis descriptivo de las respuestas del cuestionario y el feedback con la información.
6. Segundo lanzamiento de los cuestionarios. Se suministran a cada experto las opiniones de sus colegas, y se abre un debate transdisciplinario, para obtener un consenso en los resultados y una generación de conocimiento sobre el tema. El objetivo de este lanzamiento es tratar de conseguir consenso, por medio de la interrogación a expertos con este segundo cuestionario, a fin de poner de manifiesto convergencias de opiniones y deducir eventuales consensos. Cada experto argumentará los pros y los contras de las opiniones de los demás y de la suya propia.

7. Explotación de los resultados del segundo lanzamiento. El objetivo de los cuestionarios sucesivos, es alcanzar el consenso de los expertos. En esta Investigación dos rondas, la iteración de lanzamientos y explotaciones de resultados se reduce a dos lanzamientos.

En esta Tesis Doctoral 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 ha optado por el uso de la mediana y es, por tanto, el estadístico de referencia para la obtención de los pesos de los factores.

Se selecciona asimismo el rango intercuartílico 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, $RI = Q_3 - Q_1$ y se utiliza para medir el grado de consenso alcanzado, ya que ofrece una idea muy intuitiva de la desviación de los datos respecto de la mediana.

FASE 3: HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN BASADA EN REDES BAYESIANAS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APOYADOS EN ANÁLISIS MULTICRITERIO DE TIPO SCORING DOBLE

- Construcción del modelo de Inteligencia Artificial (Red Bayesiana)

Una vez seleccionadas las variables de estudio y los valores de los $SCAS_{ik}$ se procede a los construcción del modelo bayesiano. Para la aplicación de Redes Bayesianas al estudio, se trabaja con variables que no son variables discretas, para lo cual las variables continuas se discretizan en los intervalos determinados por los percentiles 25, 50 y 75 antes de construir el modelo. Éste se construye utilizando el software del proyecto Elvira para realizar los aprendizajes estructural y paramétrico. Este software se basa en la aplicación del algoritmo K2 presentado en el apartado 4.2.2.

Una vez construido se le hace un análisis de sensibilidad gracias su capacidad de inferencia y clasificación. Con ellas, cada ejemplo observado modifica la probabilidad de que la hipótesis formulada sea correcta (aumentándola o disminuyéndola). Es decir, una hipótesis que no concuerda con un conjunto de ejemplos significativos no es desechada por completo sino que se disminuirá la probabilidad estimada para la hipótesis. Los métodos bayesianos permitirán tener en cuenta en la predicción de la hipótesis el conocimiento a priori o conocimiento del do-

minio en forma de probabilidades. De este modo, además de obtener la Red Bayesiana se evalúa su robustez.

➤ Obtención de los pesos de ponderación de las variables

Los pesos de las variables se establecen gracias al análisis de la Red Bayesiana construida. El criterio utilizado para obtener el peso de cada variable es el siguiente: se realiza una clasificación de las variables según su estrato respecto a la variable “*padre*” de la red y se establecen una serie de umbrales dependientes de la “*profundidad*” de la variable dentro de la red tal como se muestra en la Figura 15. La “*profundidad*” está relacionada con el número de arcos que hay que recorrer para ir desde una variable cualquiera hasta la variable “*padre*” de la red y a las relaciones que cada nodo establece con los demás. Esta “*profundidad*” se asimila a su importancia. A este criterio se le ha denominado “*criterio de profundidad en la red*”.

Figura 15. Esquema del criterio de “*profundidad en la red*”

Una vez realizada esta estratificación, a la variable “*padre*” de la red se le asigna el peso máximo de ponderación, 10, y a las que se sitúan en el último estrato el peso mínimo, 1. El resto de pesos se reparten mediante una interpolación lineal de forma que a cada variable le corresponde el peso de ponderación correspondiente a su estrato. Las variables que quedan descol-

gadas¹⁰ se consideran con peso 0, al no tener ningún instrumento para evaluar la relación con la variable “*padre*” de la red.

➤ Análisis de la información geográfica (Scoring doble)

Utilizando los pesos obtenidos del cuestionario DELPHI y de la Red Bayesiana y de los *Standardised Criteria Assessment Score* y, gracias a la Ecuación 14, se obtiene el valor cuantitativo de la calidad de la ubicación de los puertos secos.

$$\left\{ \begin{array}{l} LQR_i = \prod_i \beta_i \cdot \prod_i \gamma_i \cdot H_{\delta EP} \cdot \sum_{\bar{k}=1}^{\bar{k}=17} \cdot \left(\sum_{k=1}^{k=41} SCAS_{i\bar{k}} \cdot W_{\bar{k}} \right)_{\bar{k}} \cdot w_k \\ \beta_i \in \mathcal{R}(0,1); \gamma_i \in \mathcal{N}(0,1); H_{\delta EP} \in \mathcal{N}(0,1) \\ i \in \mathcal{N}(1, \dots, 10); \bar{k} \in \mathcal{N}(1, \dots, 41); k \in \mathcal{N}(1, \dots, 17) \end{array} \right\}$$

Ecuación 14. Algoritmo de asignación del Location Quality Rate (general)

donde LQR_i (del inglés, *Location Quality Rate*) es el ratio de calidad de cada localización; $H_{\delta EP}$ es la función escalón de Heaviside, es decir, una función dicotómica discontinua cuyo valor es 0 para cualquier argumento a una distancia menor o igual que el umbral de protección establecido para la protección ambiental de un espacio, y 1 para cualquier argumento mayor que este umbral; los $SCAS_{i\bar{k}}$ (*Standardised Criteria Assessment Score*) son las puntuaciones de los criterios de evaluación para cada factor y localización. Por último, los w_k son los pesos de ponderación obtenidos en el cuestionario para ponderar la importancia de cada factor y los $W_{\bar{k}}$ son los pesos de ponderación de cada una de las variables. Por lo tanto, la ubicación con un valor de LQR más alto será la más apropiada para resolver el problema.

Los coeficientes β_i sirven para tener en cuenta las disposiciones políticas, la disponibilidad de mano de obra y de tecnología, el entorno legislativo y las posibilidades de crecimiento de la instalación por razones sociales y físicas.

Los coeficientes γ_i sirven para filtrar el tipo de plataforma que se evalúa de acuerdo a sus criterios de clasificación. Para los puertos secos estos criterios son: 1) conexión directa con los puertos marítimos; 2) que esta conexión se preste mediante una línea de ferrocarril; 3) permitir el despacho de aduanas. Así, en la evaluación el Sistema de Información Geográfica descar-

¹⁰ Es necesario hacer notar que el hecho de que la importancia sea 0 no hace que puedan ser eliminadas de la construcción de la Red Bayesiana dado que, de eliminarlas, la red se reordena.

ta todas las localizaciones que no se corresponden con el tipo de plataforma evaluada y se evitan comparaciones de tipos diferentes de terminales.

De cara a esta Tesis Doctoral, dado que ninguna de las localizaciones se encuentra en un área protegida, $H_{\delta EP} = 1$. Dado también que la aplicación práctica se centra en la evaluación de plataformas ya construidas se toman los $\beta_i = 1$. Por último, como para esta aplicación se evalúan exclusivamente instalaciones que cumplen los criterios para considerarse puertos secos, se toman los $\gamma_i = 1$. Estos coeficientes sí tendrían influencia a la hora de plantear el problema de selección de nuevos emplazamientos.

Así, la Ecuación 14 puede simplificarse y el *algoritmo de evaluación* puede expresarse como:

$$\left\{ LQR_i = \sum_{\bar{k}=1}^{\bar{k}=17} \cdot \left(\sum_{k=1}^{k=41} SCAS_{i\bar{k}} \cdot W_{\bar{k}} \right)_{\bar{k}} \cdot w_k \right\}$$

$$i \in \mathcal{N}(1, \dots, 10); \bar{k} \in \mathcal{N}(1, \dots, 41); k \in \mathcal{N}(1, \dots, 17)$$

Ecuación 15. Algoritmo de asignación del Location Quality Rate (*algoritmo de evaluación*)

En adelante, cuando se refiera en el texto al *algoritmo de evaluación*, se estará haciendo mención a la Ecuación 15.

➤ Evaluación de la calidad de la ubicación de los puertos secos actuales

Con los resultados obtenidos de la aplicación del *algoritmo de evaluación*, se puede establecer la calidad de la ubicación de cada uno de los puertos secos actuales. Además, seleccionando únicamente algunas de las variables, se pueden construir indicadores diferentes basados en el LQR_i para realizar análisis parciales. Uno de estos análisis, que se presenta en esta Tesis Doctoral, es la evaluación de la sostenibilidad de las localizaciones, en el cual en lugar de referirnos al LQR_i , pues este concepto alude a la calidad global, se hace referencia al *Location Sustainability Rate* (LSR_i).

6. CASO DE ESTUDIO

En este apartado se presenta la aplicación práctica de la metodología propuesta en la Tesis Doctoral. Ésta consiste en la evaluación de la calidad de las localizaciones de los puertos secos que existen actualmente en España. Además, como la organización anidada de las categorías, factores y variables permite cálculos parciales, se evalúa también la sostenibilidad de las mismas.

6.1. Caracterización del país

España es un país situado en el suroeste del continente europeo. Su red de infraestructuras se constituye como una malla con una orientación sensiblemente radial con centro en Madrid, tanto en la red de carreteras de alta capacidad como en la red ferroviaria de Interés General del Estado.

La red de carreteras de alta capacidad empleada en esta Tesis Doctoral se corresponde con la existente a fecha de 31 de diciembre de 2012 (Figura 16), dado que ésta es la última cartografía publicada por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento.

Aunque existen Declaraciones sobre la Red publicadas por el ADIF incluso para el año 2015, la limitación en la cartografía disponible para carreteras y la necesidad de comparar un instante fijo en el tiempo, hacen que se haya empleado la red correspondiente a la Declaración sobre la Red del año 2013, que muestra el estado de la red a 31 de diciembre de 2012 (Figura 17). Igualmente, el resto de mediciones de variables se han visto condicionadas por este aspecto y sus valores se han tomado para el 31 de diciembre de 2012.

Figura 16. Mapa de carreteras del Estado y red de gran capacidad a 31 de diciembre de 2012.

Fuente: Dirección General de Carreteras (Ministerio de Fomento)

Figura 17. Mapa de la red ferroviaria de Interés General del Estado a 31 de diciembre de 2012.

Fuente: Declaración sobre la red 2013 (ADIF)

En el país existen diferentes tipos de instalaciones logísticas. Sin embargo, los criterios utilizados para asignar a qué tipo pertenece cada una no son uniformes, ya que existe un umbral difuso entre los diferentes tipos de infraestructuras logísticas. De cara a esta Tesis Doctoral se establece la siguiente clasificación de las plataformas logísticas basada en la intensidad de cada modo de transporte que tiene lugar en ellas:

Figura 18. Tipos de plataformas logísticas según el modo predominante. Fuente: elaboración propia

Las terminales portuarias son lo que se viene denominando en este documento como “*puertos marítimos*”. En ellas, el transporte marítimo es el predominante y tienen habitualmente accesos ferroviarios y carreteros que conectan estos nodos con el territorio. Los centros integrados de mercancías presentan una mayor intensidad del transporte por carretera si bien están condicionados por su relación con los transportes marítimo, ferroviario y aéreo. En las terminales ferroviarias las actividades prioritarias son las relacionadas con el transporte ferroviarios, el cual habitualmente capta tráfico marítimo y carretero. En las terminales de carga aérea, el modo prioritario es el aéreo y capta tráfico ferroviario y carretero. Los puertos secos, como extensión lejana en el territorio de los puertos marítimos, tienen como modos prioritarios al marítimo y al ferroviario y tienen una influencia moderada de los modos aéreo y carretero. Por último, las zonas de actividades logísticas, al situarse en las proximidades de los puertos marítimos, presentan una mayor participación de la carretera y menor del ferrocarril.

En España el organismo público Puertos del Estado está encargado de la ejecución de la política portuaria del gobierno y de la coordinación y control de eficiencia del sistema portuario, formado por 28 Autoridades Portuarias que administran los 46 puertos de interés general,

siendo los más importantes del país de acuerdo a sus tráficos los puertos de Algeciras, Valencia y Barcelona.

Figura 19. Puertos marítimos en España. Fuente: Puertos del Estado

Asociados a estos puertos marítimos, a 31 de diciembre de 2012 existían 6 zonas de actividades logísticas y otras 10 estaban en diferentes fases de promoción.

Figura 20. Zonas de actividades logísticas en España. Fuente: Ministerio de Fomento

Existen además multitud de plataformas que podríamos considerar como centros integrados de mercancías al entender que su tráfico prioritario es por carretera. Estas instalaciones se concentran en torno a las carreteras de acceso a las grandes poblaciones del país y su densidad aumenta en el entorno de Madrid y Barcelona.

Figura 21. Centros integrados de mercancías. Fuente: Ministerio de Fomento

Las terminales ferroviarias están gestionadas por el ADIF y se encuentran, por tanto, asociadas a los itinerarios de la Red Ferroviaria de Interés General del Estado.

Figura 22. Terminales ferroviarias en España. Fuente: ADIF

Existen también cinco terminales de carga aérea: Madrid, Vitoria, Zaragoza, Valencia y Barcelona. El tipo de carga que se mueve en este tipo de terminales no suele ser contenedor sino correo, paquetería, productos perecederos y productos pequeños de alto valor. Por ello, la carga aérea no suele ser susceptible de utilizar los puertos secos como eslabón en su cadena de suministro, pero resulta interesante tenerlas en cuenta con la vista puesta en el punto 15 “Completar la definición del mapa logístico de España” de las 18 actuaciones prioritarias de la Estrategia Logística que España.

Figura 23. Terminales de carga aérea en España.

Fuente: elaboración propia a partir de información de la página web de CLASA-AENA

En el caso de los puertos secos la diferencia es clara entre las instalaciones que el Ministerio de Fomento reconoce como tales (Figura 24) y las que realmente cumplen con los criterios para serlo (Figura 25). Se recuerda que estas son: 1) conexión directa con los puertos marítimos; 2) que esta conexión se preste mediante una línea de ferrocarril; 3) permitir el despacho de aduanas.

Figura 24. Puertos secos en España según el inventario del Ministerio de Fomento

Figura 25. Localización de los puertos secos españoles según el cumplimiento de los criterios para serlo. Código, nombre y status de cada caso considerado. Fuente: elaboración propia

Como puede verse en la Figura 25, la mayoría de las terminales españolas que, de acuerdo a los criterios establecidos, pueden ser consideradas como puertos secos, se encuentran en el centro ($n = 3$) y el norte ($n = 6$) del país. Sin embargo, esta distribución no debe entenderse como una ausencia de instalaciones logísticas que cumplen parcialmente estos requisitos en el resto del país.

6.2. Aplicación de la metodología al caso práctico

En este apartado se describe cómo se ha resuelto el problema planteado mediante el empleo de las diferentes técnicas seleccionadas, de acuerdo al desarrollo metodológico presentado en el apartado 5. Por hacer más sencilla la presentación del documento, con el consiguiente beneficio para el lector, algunas de las tareas de la metodología se explican de forma conjunta. Así, la estructura de este apartado es la siguiente:

1. Caracterización de las categorías, factores y variables del estudio. Este epígrafe reúne las tareas de revisión bibliográfica, definición de los factores de decisión y definición de las variables de decisión.
2. Tratamiento de la información geográfica. En este epígrafe se desarrolla con detalle el proceso de obtención de la información geográfica, la generación de la cartografía y la obtención de los *Criteria Assessment Score*. En este último punto se recuerda la distinción realizada entre los valores medidos, $MCAS_{ik}$ y los valores normalizados $SCAS_{ik}$ mediante una interpolación segmentaria polinómica.
3. Cuestionario DELPHI. De acuerdo al planteamiento metodológico propuesto, se ha realizado un cuestionario DELPHI. En este epígrafe se describen las características más relevantes de este cuestionario y el proceso para la obtención de los pesos de ponderación de los factores de decisión.
4. Modelo bayesiano. En este epígrafe se presentan el desarrollo del modelo bayesiano, la descripción de la Red Bayesiana obtenida de la aplicación del algoritmo K2, el análisis de las relaciones existentes entre las variables y la obtención de los pesos de ponderación de las variables de decisión.
5. Análisis de la información geográfica con un *algoritmo de evaluación* de tipo Scoring Doble. Una vez obtenidos los pesos de ponderación de las variables es posible aplicar el *algoritmo de evaluación* presentado en la metodología. En este epígrafe se reúnen y analizan los resultados del modelo de evaluación de la calidad de las localizaciones de puertos secos. Estos resultados se distinguen de acuerdo a la estructura anidada, de forma que es posible evaluar por separado resultados parciales de las diferentes categorías, así como combinaciones de ellas. En concreto, se presentan los resultados de la combinación de las dos primeras categorías, que permiten evaluar la sostenibilidad de las localizaciones; así como de las cuatro categorías, obteniéndose la calidad total de las localizaciones.

6.2.1. Caracterización de las categorías, factores y variables del estudio

A partir de la revisión literaria presentada en los apartados anteriores, se han identificado un conjunto de factores que influyen en la planificación de la localización de los puertos secos.

Estos factores se presentan en esta Tesis Doctoral clasificados dentro de cuatro categorías:

- Categoría 1 - Criterios medioambientales. Esta categoría incluye aquellos factores que están relacionados con la afección al medio en el cual se localiza un puerto seco. Hay que entender esta afección no sólo como los efectos que se producen sobre el medio ambiente sino también sobre el medio urbano. Además, merecen especial atención las afecciones sobre el medio hidrológico, dada su relevancia en el medio ambiente.
- Categoría 2 - Criterios socioeconómicos. Entran en esta categoría los factores relacionados con la sociedad y la economía del marco en el que se localiza un puerto seco.
- Categoría 3 - Criterios de accesibilidad. Se incluyen en esta categoría los factores relativos a la facilidad para acceder a las principales redes y nodos infraestructurales, así como a la dotación de servicios y suministros.
- Categoría 4 - Criterios de localización. Esta categoría es la que aglutina los factores geográficos de una localización, así como los relativos a la relación que se produce entre un puerto seco y su hinterland.

En la Tabla 1 se presenta el conjunto de factores identificado, agrupando estos de acuerdo a los criterios que acaban de ser presentados. Es necesario hacer notar en este punto que esta estructura anidada no es casual, sino que con las dos primeras categorías es posible incorporar el enfoque de la sostenibilidad a la evaluación de la calidad de las localizaciones de los puertos secos; por su parte, las dos últimas categorías profundizan en el desarrollo territorial, mostrando la capacidad de los puertos secos para incidir sobre el territorio.

Tabla 1. Factores que influyen en la localización de puertos secos

CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES	CRITERIOS SOCIOECONÓMICOS
* Protección Ambiental 1) Impacto sobre el medio natural 2) Impacto sobre el medio urbano 3) Afección hidrológica	1) Precio del suelo 2) Cercanía de la demanda 3) Disponibilidad de mano de obra 4) Crecimiento potencial de la demanda 5) Disponibilidad de tecnología 6) Costes de construcción y gestión 7) Rango del municipio de acogida 8) Entorno legislativo 9) Disposiciones políticas 10) Posibilidad de crecimiento de la instalación (por razones sociales)
CRITERIOS DE ACCESIBILIDAD	CRITERIOS DE LOCALIZACIÓN
1) Accesibilidad a la red ferroviaria 2) Accesibilidad a la red de carreteras de alta capacidad 3) Accesibilidad a aeropuertos 4) Accesibilidad a puertos marítimos 5) Accesibilidad a la dotación de suministros y servicios	1) Clima 2) Orografía 3) Geología 4) Relación con otras plataformas logísticas 5) Integración en los principales corredores de transporte de mercancías 6) Optimización potencial del reparto modal 7) Posibilidad de crecimiento de la instalación (por razones físicas)

Fuente: elaboración propia a partir de la revisión de la literatura.

Las variables utilizadas en los problemas de localización responden a la “*capacidad de acogida*” o a la “*restricción de uso*” de la ubicación. En este sentido, como propone Azcárate (2007), en el diseño de las metodologías para la selección del emplazamiento de una instalación considerada NIMBY¹¹, como es el caso de los puertos secos debido a que son instalaciones industriales duras, se realizan una serie de etapas que permiten la jerarquización y ponderación de diversos factores, así como la integración secuencial de los resultados parciales obtenidos. Estas etapas han sido las siguientes:

- Fase de exclusión: definición de una serie de criterios de carácter excluyente, cuya aplicación determina la eliminación de zonas donde la localización de este tipo de instalaciones no es aceptable.

¹¹ NIMBY son las siglas de la expresión “Not In My Back Yard” (que significa “no en mi patio trasero”). Consiste en la reacción ciudadana para enfrentarse a los riesgos que supone la instalación en su entorno inmediato de ciertas actividades o instalaciones que son percibidas como peligrosas o nocivas, pero sin oponerse a las actividades en sí mismas. Es decir, que se acepta la actividad pero no se quiere tener cerca.

- Fase de delimitación: delimitación de un conjunto de factores que nos permiten medir la adecuación de los distintos lugares que han superado los criterios de restricción anteriores.
- Fase de valoración: selección, entre las zonas con mayor aptitud territorial, de la alternativa más adecuada para la ubicación de la instalación, mediante la aplicación de criterios de valoración.

En esta Tesis Doctoral, dado que no se propone una metodología para la búsqueda de la localización más adecuada, sino para evaluar la calidad de las localizaciones actuales, sólo se tienen en cuenta los factores relativos a la restricción de uso que se corresponden a las fases de exclusión y delimitación. De acuerdo a esta pauta, se seleccionan un conjunto de 17 factores a evaluar (numerados de 1 a 17), los cuales se presentan en la Tabla 2. En ella, se incorporan también otros factores que no entran en la evaluación (señalados con *, ** y ***):

- El factor “*Protección ambiental*”, el cual evalúa la pertenencia o no de cada puerto seco a un área con protección medioambiental, mediante la inclusión de una función escalón de Heaviside.
- Los factores correspondientes a los coeficientes β_i (relativos a las disposiciones políticas, la disponibilidad de mano de obra y de tecnología, el entorno legislativo y las posibilidades de crecimiento de la instalación por razones sociales y físicas). Como ya se ha mencionado, estos factores no entran en la evaluación realizada, dado que se trata de puertos secos ya construidos en los cuales, por tanto, no tiene sentido realizar esta valoración.
- Los factores correspondientes a los coeficientes γ_i que sirven para confirmar que la instalación evaluada es un puerto seco (conexión directa con los puertos marítimos, que esta conexión se preste mediante una línea de ferrocarril y la posibilidad de realizar el despacho de aduanas en las instalaciones de la terminal).

Tabla 2. Factores relativos a la restricción de uso

Nº	NOMBRE DEL FACTOR	CÓDIGO DE FACTOR
*	Protección Ambiental	$H_{\delta EP}$
**	Coeficientes β_i	β_i
***	Coeficientes γ_i	γ_i
1	Impacto sobre el medio natural	imp_nat
2	Impacto sobre el medio urbano	imp_urb
3	Afección hidrológica	hydro
4	Precio del suelo	land_pri
5	Crecimiento potencial de la demanda	dem_gro
6	Rango del municipio de acogida	mun_ran
7	Accesibilidad a la red ferroviaria	acc_rail
8	Accesibilidad a las principales carreteras de alta capacidad	acc_road
9	Accesibilidad a aeropuertos	acc_air
10	Accesibilidad a puertos marítimos	acc_port
11	Accesibilidad a la dotación de suministros y servicios	acc_sup
12	Clima	wea
13	Orografía	orog
14	Geología	geol
15	Relación con otras plataformas logísticas	rel_plat
16	Integración en los principales corredores	sup_cha
17	Optimización potencial del reparto modal	mod_shi

Fuente: elaboración propia a partir de la revisión de la literatura.

Cada uno de los factores presentados en la Tabla 2 depende de una serie de variables. La categoría 1 comprende 3 factores y 9 variables; la categoría 2, 3 factores y 6 variables; la categoría 3, 5 factores y 10 variables; la categoría 4, 6 factores y 15 variables. Es decir, el modelo consta de 4 categorías, 17 factores y 40 variables¹².

Esta clasificación puede consultarse en la Tabla 3. Al igual que pasa con los factores, hay variables que afectan a la localización pero quedan fuera del análisis. Las razones entroncan de nuevo con el alcance de la Tesis Doctoral, que se centra en la evaluación de la calidad de las localizaciones actuales, por lo que se descartan las variables que son completamente subjetivas o inmensurables una vez construido el puerto seco, aquellas que se salen del enfoque de la evaluación y, por último, aquellas variables de las cuales no existen registros con los que generar la base de datos.

¹² A estas variables, de cara a la construcción de la Red Bayesiana, es necesario incluir el *Location Quality Rate (LQR)*, por lo que la red consta de 41 nodos aunque se evalúen 40 variables. El motivo de esta inclusión se explica en el apartado 6.2.4.

Tabla 3. Factores y variables 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 socioeconómicos	land_pri	Precio del suelo	LP	Precio del suelo	INE
	dem_gro	Crecimiento potencial de la demanda	IPI	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 marítimos	DP	Puertos a menos de 600 Km	Puertos del Estado
	acc_sup	Accesibilidad a servicios y suministros	CSS	Presencia de servicios y suministros	Cartografía GIS
Factores de localización	wea	Clima	CV	Variedad climática	IGN
			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

6.2.2. Tratamiento de la información geográfica

Acudiendo a las fuentes de información recogidas en la última columna de la Tabla 3, se genera una base de datos de información geográfica relevante tanto para esta aplicación práctica como para futuros proyectos que la puedan necesitar. El proceso de tratamiento de los datos geográficos (ver Figura 26) parte de la base de datos en bruto, la cual se estructura mediante un proceso de georreferenciación. En esta base de datos estructurada resulta sencillo hacer búsquedas de elementos definidos por su localización. Estos datos de consulta son lo que se ha denominado como *Measured Criteria Assessment Score* ($MCAS_{ik}$). Convirtiendo todas las variables en variables de tipo “beneficio” y normalizando estos valores mediante una interpolación segmentaria polinómica (spline) con diferentes condiciones de contorno según la interpolación sea lineal, cuadrática o cúbica se obtienen los *Standardised Criteria Assessment Score* ($SCAS_{ik}$), que son los valores que entran en juego en el *algoritmo de evaluación*.

Figura 26. Proceso de tratamiento de los datos geográficos. Fuente: elaboración propia

A partir de la georreferenciación¹³ de datos estadísticos en bruto es posible posicionar entidades de datos en una localización geográfica única definida a través de un sistema de coordenadas y datum de referencia específicos.

Esta técnica es utilizada habitualmente en los software de Sistemas de Información Geográfica, tanto para objetos ráster (imágenes de mapa de píxeles) como para objetos vectoriales (puntos, líneas, polilíneas y polígonos que representan objetos físicos).

En el caso de estudio de esta Tesis Doctoral, se georreferencian entidades puntuales, como pueden ser localizaciones de puertos marítimos o terminales logísticas; polilíneas, como los

¹³ La georreferenciación es un aspecto fundamental en el análisis de datos geoespaciales, pues es la base para la correcta localización de la información de mapa y, por ende, de la adecuada fusión y comparación de datos procedentes de diferentes fuentes en diferentes localizaciones espaciales y/o temporales.

itinerarios de carreteras y líneas de ferrocarril; y polígonos, por ejemplo de áreas con niveles de protección ambiental elevados o regiones climáticas.

Cada uno de estos elementos se referencia, cuando es posible, a unas coordenadas concretas. Y, cuando no, al menos al municipio/provincia/Comunidad Autónoma en que se encuadra, dependiendo de la disponibilidad de datos para entidades unitarias inferiores al municipio/provincia/Comunidad Autónoma.

Una vez georreferenciada la base de datos, se toman las medidas de los valores de las variables para cada una de las 10 localizaciones de los puertos secos existentes en la actualidad en España. Esta selección se automatiza para algunas variables gracias a las funciones del software ArcGIS10.

Las pautas tenidas en cuenta para establecer las mediciones de cada variable y localización se describen a continuación, ordenadas por factores. Asimismo, se presentan las tablas de los *Measured Criteria Assessment Score* y los *Standardised Criteria Assessment Score*.

1. Impacto en el medio natural

Las puntuaciones de las variables relacionadas con el “*Impacto sobre el medio natural*” 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. 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. Hay que mencionar que en este estudio no se ha establecido una distancia mínima como tal, ya que sólo es necesario realizar una comparación entre las distancias que presentan los diferentes puertos secos. Esta situación se salva mediante la ya mencionada función $H_{\delta EP}$ para la protección ambiental, que descarta las localizaciones en áreas protegidas.

Tabla 4. MCAS del factor “Impacto en el medio natural”. Fuente: cartografías de la Red Natura 2000 y propias

VARIABLE	DISTANCIA A ESPACIOS	CONECTIVIDAD EN ESPACIOS	NÚMERO DE ESPACIOS	DENSIDAD DE LA INSTALACIÓN
Cómo se mide	Distancia euclídea a un espacio natural (en Km) - mide ruido y emisiones/residuos - mejor cuanto mayor distancia	Conectividad ecológica (5 si desconecta sólo una rama, 0 si desconecta dos ramas) - mejor cuanto mayor	Integridad / Perturbación (número de espacios aislados) - mejor cuanto menor	Tipo de localización (10 si concentrada, 0 si dispersa) - mejor cuanto mayor
MCAS				
Antequera	1.65	0	10	10
Santander-Ebro	1	0	2	10
Azuqueca	2.5	0	3	0
La Robla	11	0	4	0
T. de los Vados	6.4	0	4	10
Villafría	2.3	0	2	10
Venta de Baños	2.5	0	3	10
M. de Lemos	0.9	0	3	10
Coslada	4.4	0	12	10
Abroñigal	7	0	14	10
SCAS				
Antequera	1.50	0.00	0.00	10.00
Santander-Ebro	0.91	0.00	7.50	10.00
Azuqueca	2.27	0.00	5.00	0.00
La Robla	10.00	0.00	2.50	0.00
T. de los Vados	5.82	0.00	2.50	10.00
Villafría	2.09	0.00	7.50	10.00
Venta de Baños	2.27	0.00	5.00	10.00
M. de Lemos	0.82	0.00	5.00	10.00
Coslada	4.00	0.00	0.00	10.00
Abroñigal	6.36	0.00	0.00	10.00

2. Impacto en el medio urbano

Las puntuaciones de las variables relacionadas con el *"Impacto en el medio urbano"* siguen la misma lógica que las variables anteriores. La primera variable es el ruido. Son mejores aquellas localizaciones situadas a distancias más largas de las zonas urbanas. También tienen mejor puntuación las localizaciones que producen un menor número de espacios inconexos en el territorio, al permitir una mayor permeabilidad de los desplazamientos. Sin embargo, el medio urbano hace que el número de espacios aislados no suponga ninguna diferencia, dado que los puertos secos suelen estar fuera de la trama urbana (incluso fuera de la periferia urbana) y se suelen poner los medios infraestructurales para integrar los elementos de los mismos que afectan a las ciudades.

Tabla 5. MCAS del factor *"Impacto en el medio urbano"*. Fuente: cartografías de la Red Natura 2000 y propias

VARIABLE	DISTANCIA A ESPACIOS URBANOS	CONECTIVIDAD EN ESPACIOS URBANOS
Cómo se mide	Distancia euclídea a un espacio urbano (en Km) - mide ruido y emisiones/residuos - mejor cuanto mayor distancia	Conectividad humana (distancia en Km entre cruces transversales) - mejor cuanto menor
MCAS		
Antequera	0.25	1.00
Santander-Ebro	0.00	6.00
Azuqueca	0.00	2.00
La Robla	0.20	1.00
T. de los Vados	0.20	0.50
Villafría	0.00	4.00
Venta de Baños	0.35	2.00
M. de Lemos	0.61	1.00
Coslada	0.20	3.00
Abroñigal	0.00	4.00
SCAS		
Antequera	2.50	6.67
Santander-Ebro	0.00	0.00
Azuqueca	0.00	3.33
La Robla	2.00	6.67
T. de los Vados	2.00	8.33
Villafría	0.00	0.00
Venta de Baños	3.50	3.33
M. de Lemos	6.10	6.67
Coslada	2.00	0.00
Abroñigal	0.00	0.00

3. Hidrología

El factor “*Hidrología*” mide la afección hidrológica de cada localización. Así, 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.

Tabla 6. MCAS del factor “Hidrología”. Fuente: cartografías del Instituto Geográfico Nacional

VARIABLE	DISTANCIA A CURSOS SUPERFICIALES	RIESGO DE INUNDACIÓN	PRESENCIA DE ACUÍFEROS
Cómo se mide	Distancia euclídea a cursos superficiales (en Km) - mejor cuanto mayor distancia	Zona inundable (0 si riesgo máximo, 5 si riesgo medio, 10 si riesgo mínimo) - mejor cuanto mayor	Presencia de acuíferos (10 si no hay, 0 si hay) - mejor cuanto mayor
MCAS			
Antequera	0.38	10.00	0.00
Santander-Ebro	1.00	0.00	0.00
Azuqueca	0.79	5.00	0.00
La Robla	0.00	0.00	0.00
T. de los Vados	0.00	10.00	10.00
Villafra	2.30	10.00	0.00
Venta de Baños	2.35	0.00	0.00
M. de Lemos	0.90	10.00	10.00
Coslada	4.57	0.00	0.00
Abroñigal	0.00	5.00	0.00
SCAS			
Antequera	0.76	10.00	0.00
Santander-Ebro	2.00	0.00	0.00
Azuqueca	1.58	5.00	0.00
La Robla	0.00	0.00	0.00
T. de los Vados	0.00	10.00	10.00
Villafra	4.60	10.00	0.00
Venta de Baños	4.70	0.00	0.00
M. de Lemos	1.80	10.00	10.00
Coslada	9.14	0.00	0.00
Abroñigal	0.00	5.00	0.00

4. Precio del suelo

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, es necesario alcanzar un equilibrio entre la elección del suelo más barato y la necesidad de dotar a esta zona de infraestructuras que garanticen su accesibilidad. Como la accesibilidad se mide a través de otros factores, interesarán en este factor aquellas localizaciones en que el precio del suelo es menor.

Tabla 7. MCAS del factor “*Precio del suelo*”. Fuente: cartografías del Instituto Nacional de Estadística

VARIABLE	PRECIO DEL SUELO
Cómo se mide	Precio medio provincial en €/m ² - mejor cuanto menor
MCAS	
Antequera	263.00
Santander-Ebro	227.10
Azuqueca	176.80
La Robla	42.50
T. de los Vados	42.50
Villafría	48.80
Venta de Baños	62.10
M. de Lemos	82.10
Coslada	425.80
Abroñigal	425.80
SCAS	
Antequera	4.74
Santander-Ebro	5.46
Azuqueca	6.46
La Robla	9.15
T. de los Vados	9.15
Villafría	9.02
Venta de Baños	8.76
M. de Lemos	8.36
Coslada	1.48
Abroñigal	1.48

5. Crecimiento potencial de la demanda

El “*Crecimiento potencial de la demanda*” evalúa las condiciones económicas del emplazamiento en torno a tres variables que inciden en la demanda de productos de consumo: el Índice de Producción Industrial, el Producto Interior Bruto y la Tasa de Paro. Toda esta información económica se toma en el modelo a nivel provincial, al ser la escala con mayor detalle a la que existen datos de los indicadores utilizados.

Tabla 8. MCAS del factor “Crecimiento potencial de la demanda”. Fuente: cartografías del Instituto Nacional de Estadística

VARIABLE	ÍNDICE DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL	PRODUCTO INTERIOR BRUTO	TASA DE PARO
Cómo se mide	Índice de Producción Industrial por CCAA (Marzo 2014) - mejor cuanto mayo	PIB per cápita medio en euros por CCAA (2013) - mejor cuanto mayor	Tasa de paro según la EPA (primer trimestre 2014) - mejor cuanto menor
MCAS			
Antequera	91.71	16666.00	36.52
Santander-Ebro	101.97	24732.00	23.69
Azuqueca	87.77	17780.00	23.01
La Robla	97.56	21879.00	26.48
T. de los Vados	97.56	21879.00	26.48
Villafria	97.56	21879.00	18.11
Venta de Baños	97.56	21879.00	23.26
M. de Lemos	89.81	20399.00	21.86
Coslada	86.92	28915.00	20.43
Abroñigal	86.92	28915.00	20.43
SCAS			
Antequera	5.32	5.76	0.00
Santander-Ebro	9.98	8.55	4.50
Azuqueca	3.53	6.15	4.74
La Robla	7.98	7.57	3.52
T. de los Vados	7.98	7.57	3.52
Villafria	7.98	7.57	6.46
Venta de Baños	7.98	7.57	4.65
M. de Lemos	4.46	7.05	5.14
Coslada	3.15	10.00	5.64
Abroñigal	3.15	10.00	5.64

6. Rango del municipio de acogida

El “*Rango del municipio de acogida*” se concibe como el ratio entre los beneficios por el acceso a una gran población y los perjuicios que se producen sobre ella como externalidades de la actividad que se desarrolla en los puertos secos. Así, 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.

Tabla 9. MCAS del factor “Rango del municipio de acogida”. Fuente: cartografías del Instituto Nacional de Estadística

VARIABLE	POBLACIÓN	DENSIDAD DE POBLACIÓN
Cómo se mide	Población - mejor cuanto mayor	Densidad de población en hab/Km ² - mejor cuanto menor
MCAS		
Antequera	41827.00	55.82
Santander-Ebro	1045.00	38.59
Azuqueca	35146.00	1785.87
La Robla	4610.00	54.10
T. de los Vados	2130.00	88.27
Villafría	179906.00	1680.42
Venta de Baños	6472.00	454.18
M. de Lemos	19604.00	98.27
Coslada	91832.00	7652.67
Abroñigal	3233527.00	5337.88
SCAS		
Antequera	10.00	9.44
Santander-Ebro	0.30	9.61
Azuqueca	10.04	0.00
La Robla	1.32	9.46
T. de los Vados	0.61	9.12
Villafría	10.00	0.00
Venta de Baños	1.85	5.46
M. de Lemos	5.60	9.02
Coslada	10.00	0.00
Abroñigal	10.00	0.00

7. Accesibilidad a la red ferroviaria

Para evaluar la “*Accesibilidad a la red ferroviaria*” se tienen en cuenta: el tipo de acceso, el 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. Y, es que, no sólo resulta importante poder acceder a la red sino que el acceso reúna unas condiciones que faciliten el tráfico que tiene lugar. Los mejores resultados se obtienen para lugares con acceso directo, cerca de nudos ferroviarios y para vías con las máximas prestaciones.

Tabla 10. MCAS del factor “*Accesibilidad a la red ferroviaria*”. Fuente: cartografías del Administrador de Infraestructuras Ferroviarias y propias

VARIABLE	NÚMERO DE VÍAS EN EL ACCESO FERROVIARIO	IMPORTANCIA DE LA RED FERROVIARIA EN EL ENTORNO	CENTRALIDAD RESPECTO A LA DEMANDA	CALIDAD DE LA RED FERROVIARIA
Cómo se mide	Número de vías en la playa de acceso - mejor cuanto mayor	Zona de importancia ferroviaria o cercanía a nodo ferroviario (valoración de 0 a 10) - mejor cuanto mayor	Número de capita- les de provincia con acceso directo desde la localización - mejor cuanto mayor	Electrificación y capacidad de la red principal (10 si electrificada doble, 5 si electrificada simple o no electrificada simple, 0 si no electrificada y simple) - mejor cuanto mayor
MCAS				
Antequera	12.00	6.00	4.00	10.00
Santander-Ebro	3.00	2.00	3.00	10.00
Azuqueca	8.00	4.00	10.00	10.00
La Robla	10.00	6.00	4.00	10.00
T. de los Vados	8.00	6.00	3.00	5.00
Villafria	12.00	2.00	7.00	10.00
Venta de Baños	5.00	8.00	4.00	10.00
M. de Lemos	5.00	4.00	7.00	5.00
Coslada	40.00	10.00	7.00	10.00
Abroñigal	50.00	10.00	22.00	10.00
SCAS				
Antequera	10.00	6.00	4.00	10.00
Santander-Ebro	3.00	2.00	3.00	10.00
Azuqueca	8.00	4.00	10.00	10.00
La Robla	10.00	6.00	4.00	10.00
T. de los Vados	8.00	6.00	3.00	5.00
Villafria	10.00	2.00	7.00	10.00
Venta de Baños	5.00	8.00	4.00	10.00
M. de Lemos	5.00	4.00	7.00	5.00
Coslada	10.00	10.00	7.00	10.00
Abroñigal	10.00	10.00	10.00	10.00

8. Accesibilidad a la red de carreteras de alta capacidad

La “Accesibilidad a las carreteras de alta capacidad” contempla la posibilidad de acceso a la red de carreteras y la calidad de la carretera a la que se accede: 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. 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.

Tabla 11. MCAS del factor “Accesibilidad a la red de carreteras de alta capacidad”. Fuente: cartografías del Ministerio de Fomento

VARIABLE	ACCESO DIRECTO A CARRETERAS DE ALTA CAPACIDAD	DISTANCIA A CARRETERAS DE ALTA CAPACIDAD	NÚMERO DE CARRILES
Cómo se mide	Acceso directo a la red de alta capacidad (10 si acceso directo, 5 si acceso a través de convencional, 0 si acceso a través de comarcal) - mejor cuanto mayor	Distancia euclídea a una carretera de alta capacidad (en Km) - mejor cuanto menor	Número de carriles totales (en ambos sentidos) de la carretera de alta capacidad más cercana - mejor cuanto mayor
MCAS			
Antequera	0.00	9.00	4.00
Santander-Ebro	5.00	15.00	4.00
Azuqueca	10.00	0.00	6.00
La Robla	5.00	16.00	4.00
T. de los Vados	5.00	5.00	4.00
Villafría	10.00	0.00	4.00
Venta de Baños	5.00	4.00	4.00
M. de Lemos	0.00	50.00	0.00
Coslada	10.00	0.00	10.00
Abroñigal	10.00	0.00	10.00
SCAS			
Antequera	0.00	4.00	10.00
Santander-Ebro	5.00	0.00	10.00
Azuqueca	10.00	10.00	10.00
La Robla	5.00	0.00	10.00
T. de los Vados	5.00	6.67	10.00
Villafría	10.00	10.00	10.00
Venta de Baños	5.00	7.33	10.00
M. de Lemos	0.00	0.00	0.00
Coslada	10.00	10.00	10.00
Abroñigal	10.00	10.00	10.00

9. Accesibilidad a aeropuertos

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.

Tabla 12. MCAS del factor “*Accesibilidad a aeropuertos*”. Fuente: cartografías propias

VARIABLE	DISTANCIA A AEROPUERTOS
Cómo se mide	Distancia euclídea al aeropuerto más cercano (en Km) - mejor cuanto menor
MCAS	
Antequera	60.10
Santander-Ebro	36.70
Azuqueca	33.30
La Robla	36.70
T. de los Vados	124.00
Villafría	1.40
Venta de Baños	52.50
M. de Lemos	120.00
Coslada	7.70
Abroñigal	16.00
SCAS	
Antequera	0.00
Santander-Ebro	2.66
Azuqueca	3.34
La Robla	2.66
T. de los Vados	0.00
Villafría	9.72
Venta de Baños	0.00
M. de Lemos	0.00
Coslada	8.46
Abroñigal	6.80

10. Accesibilidad a puertos marítimos

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 inferior a 600 Km. Esta distancia fue seleccionada utilizando como referencias los estudios realizados por CAI (2011) y Atlantic Transnational Network (2006) y la estructura de costes del transporte intermodal según el Ministerio de Fomento (2011).

Tabla 13. MCAS del factor “Accesibilidad a puertos marítimos” Fuente: cartografías de Puertos del Estado

VARIABLE	PUERTOS A MENOS DE 600 KM
Cómo se mide	Número de Puertos pertenecientes a la red de puertos de interés del Estado situados a menos de 600 Km
MCAS	
Antequera	7.00
Santander-Ebro	7.00
Azuqueca	2.00
La Robla	7.00
T. de los Vados	8.00
Villafría	5.00
Venta de Baños	5.00
M. de Lemos	7.00
Coslada	2.00
Abroñigal	2.00
SCAS	
Antequera	8.75
Santander-Ebro	8.75
Azuqueca	2.50
La Robla	8.75
T. de los Vados	10.00
Villafría	6.25
Venta de Baños	6.25
M. de Lemos	8.75
Coslada	2.50
Abroñigal	2.50

11. Accesibilidad a servicios y suministros

El factor “*Accesibilidad a servicios y suministros*” mide el acceso que una localización tiene a las principales redes de suministro. En este caso, todas las localizaciones evaluadas tienen acceso completo a los mismos.

Tabla 14. MCAS del factor “*Accesibilidad a servicios y suministros*”. Fuente: cartografías propias

VARIABLE	PRESENCIA DE SERVICIOS Y SUMINISTROS
Cómo se mide	Existencia de servicios en la ubicación (10 si existe, 0 si no) - mejor cuanto mayor
MCAS	
Antequera	10.00
Santander-Ebro	10.00
Azuqueca	10.00
La Robla	10.00
T. de los Vados	10.00
Villafria	10.00
Venta de Baños	10.00
M. de Lemos	10.00
Coslada	10.00
Abroñigal	10.00
SCAS	
Antequera	10.00
Santander-Ebro	10.00
Azuqueca	10.00
La Robla	10.00
T. de los Vados	10.00
Villafria	10.00
Venta de Baños	10.00
M. de Lemos	10.00
Coslada	10.00
Abroñigal	10.00

12. Clima

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

Tabla 15. MCAS del factor “Clima”. Fuente: cartografías del Instituto Geográfico Nacional y de la Agencia Estatal de Meteorología

VARIABLE	VARIEDAD CLIMÁTICA	DÍAS ANUALES DE LLUVIA	DÍAS ANUALES DE NEVADAS
Cómo se mide	Tipo de clima (10 si suave, 5 si medio, 0 si extremo tanto en invierno como en verano) - mejor cuanto mayor	Precipitaciones media en l/m ² y año - mejor cuanto menor	Heladas (10 si no hay más de 20 heladas al año, 0 si las hay) - mejor cuanto mayor
MCAS			
Antequera	5.00	551.00	10.00
Santander-Ebro	0.00	313.00	10.00
Azuqueca	0.00	447.00	10.00
La Robla	0.00	774.70	0.00
T. de los Vados	5.00	668.00	10.00
Villafra	0.00	555.00	0.00
Venta de Baos	0.00	455.00	0.00
M. de Lemos	10.00	1084.00	10.00
Coslada	0.00	436.00	10.00
Abroñigal	0.00	436.00	10.00
SCAS			
Antequera	5.00	4.49	10.00
Santander-Ebro	0.00	6.87	10.00
Azuqueca	0.00	5.53	10.00
La Robla	0.00	2.25	0.00
T. de los Vados	5.00	3.32	10.00
Villafra	0.00	4.45	0.00
Venta de Baos	0.00	5.45	0.00
M. de Lemos	10.00	0.00	10.00
Coslada	0.00	5.64	10.00
Abroñigal	0.00	5.64	10.00

13. Orografía

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.

Tabla 16. MCAS del factor “Orografía”. Fuente: cartografías propias

VARIABLE	ONDULACIÓN DEL TERRENO	PENDIENTE DEL TERRENO
Cómo se mide	Ondulación del terreno (10 si llano, 2 si ondulado, 0 si montañoso) - mejor cuanto mayor	Pendiente aproximada del acceso en ‰ - mejor cuanto menor
MCAS		
Antequera	10.00	0.00
Santander-Ebro	10.00	0.00
Azuqueca	10.00	2.00
La Robla	2.00	3.00
T. de los Vados	2.00	3.00
Villafría	10.00	1.00
Venta De Baños	10.00	0.00
M. de Lemos	2.00	2.00
Coslada	10.00	0.00
Abroñigal	10.00	0.00
SCAS		
Antequera	10.00	9.44
Santander-Ebro	0.30	9.61
Azuqueca	10.04	0.00
La Robla	1.32	9.46
T. de los Vados	0.61	9.12
Villafría	10.00	0.00
Venta De Baños	1.85	5.46
M. de Lemos	5.60	9.02
Coslada	10.00	0.00
Abroñigal	10.00	0.00

14. Geología

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.

Tabla 17. MCAS del factor “Geología”. Fuente: cartografías geocientíficas del Instituto Geológico y Minero de España

VARIABLE	EXCAVABILIDAD	RESISTENCIA A COMPRESIÓN
Cómo se mide	Resistencia a la excavación - mejor cuanto menor	Resistencia a la compresión - mejor cuanto mayor
MCAS		
Antequera	6.39	1950.00
Santander-Ebro	0.43	800.00
Azuqueca	0.00	700.00
La Robla	8.26	2600.00
T. de los Vados	0.87	900.00
Villafría	0.43	800.00
Venta de Baños	0.00	700.00
M. de Lemos	0.43	800.00
Coslada	10.00	3000.00
Abroñigal	8.26	2600.00
SCAS		
Antequera	6.39	6.50
Santander-Ebro	0.43	2.67
Azuqueca	0.00	2.33
La Robla	8.26	8.67
T. de los Vados	0.87	3.00
Villafría	0.43	2.67
Venta de Baños	0.00	2.33
M. de Lemos	0.43	2.67
Coslada	10.00	10.00
Abroñigal	8.26	8.67

15. Relación con otras plataformas logísticas

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.

La distancia a otras plataformas logísticas ofrece la posibilidad de evaluar la relación entre cada puerto seco y el resto del sistema logístico del país. La región del territorio en que un puerto tiene ventajas notables en el acceso terrestre se denomina “*hinterland cautivo*”. Estas áreas presentan una ventaja competitiva, ya que generalmente en ellas tiene lugar la mayor parte del movimiento de mercancías, tanto de entrada como de salida (Camarero y González, 2005). Así, los precios aumentan con la distancia al puerto hasta llegar al “*alcance máximo*”, punto en que ya es más rentable buscar el bien o servicio en otro lugar más cercano. Este efecto también se produce en el interior del territorio, por lo que los puertos secos se presentan también como una oportunidad para fortalecer las soluciones intermodales como parte de una cadena integrada de transporte implicando no sólo a la carretera en el transporte entre el puerto marítimo y su hinterland sino también al ferrocarril (Roso, 2008). Pueden ser considerados, por tanto, 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, utilizando además el medio de transporte más sostenible y más adecuado en cada tramo.

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.

Obviamente, la calidad de los servicios logísticos prestados y las tasas por los mismos, son los principales factores de éxito en esta zona de influencia. Sin embargo, este sistema puede generar un modelo de ubicación geográfica competitiva desordenado que dé prioridad a la gestión económica sobre otros factores (Monios, 2011). En este sentido, es mejor 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). En tal circunstancia, las estrategias de localización se basan en la relación con las instalaciones existentes, incluso si esto implica la selección de ubicaciones de sub-óptimas.

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). Por lo tanto, 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).

Tabla 18. MCAS del factor "Relación con otras plataformas logísticas". Fuente: cartografías del Ministerio de Fomento

VARIABLE	NÚMERO DE PLATAFORMAS LOGÍSTICAS CERCANAS	NÚMERO DE PLATAFORMAS LOGÍSTICAS A MEDIA DISTANCIA	PERTENENCIA A UN ÁREA INDUSTRIAL CONSOLIDADA
Cómo se mide	Número de plataformas logísticas cercanas - mejor cuanto menor (evitar aglomeración)	Número de plataformas logísticas a media distancia o lejanas - mejor cuanto mayor (premiar densificación)	Pertenencia a un área industrial consolidada (10 si importante, 5 si pequeña) - mejor cuanto mayor
MCAS			
Antequera	2.00	28.00	5.00
Santander-Ebro	5.00	59.00	10.00
Azuqueca	27.00	100.00	10.00
La Robla	4.00	70.00	5.00
T. de los Vados	10.00	70.00	5.00
Villafria	7.00	100.00	10.00
Venta de Baños	8.00	60.00	5.00
M. de Lemos	2.00	50.00	5.00
Coslada	12.00	120.00	10.00
Abroñigal	7.00	120.00	10.00
SCAS			
Antequera	8.00	2.80	5.00
Santander-Ebro	5.00	5.90	10.00
Azuqueca	0.00	10.00	10.00
La Robla	6.00	7.00	5.00
T. de los Vados	0.00	7.00	5.00
Villafria	3.00	10.00	10.00
Venta de Baños	2.00	6.00	5.00
M. de Lemos	8.00	5.00	5.00
Coslada	0.00	10.00	10.00
Abroñigal	3.00	10.00	10.00

16. Integración en los principales corredores

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.

Tabla 19. MCAS del factor “Integración en los principales corredores”. Fuente: cartografías del Administrador de Infraestructuras Ferroviarias

VARIABLE	DISTANCIA A UN CORREDOR PRINCIPAL DE MERCANCÍAS
Cómo se mide	Distancia euclídea a corredores prioritarios de transporte de mercancías (en Km) - mejor cuanto menor distancia
MCAS	
Antequera	98.20
Santander-Ebro	0.00
Azuqueca	0.00
La Robla	25.60
T. de los Vados	131.00
Villafría	0.00
Venta de Baños	0.00
M. de Lemos	225.00
Coslada	0.00
Abroñigal	0.00
SCAS	
Antequera	1.00
Santander-Ebro	7.00
Azuqueca	8.00
La Robla	2.00
T. de los Vados	0.00
Villafría	6.00
Venta de Baños	5.00
M. de Lemos	3.00
Coslada	9.00
Abroñigal	10.00

17. Optimización potencial del reparto modal

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 (siempre que las líneas existentes permitan el tráfico mixto), 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.

Tabla 20. MCAS del factor “Optimización potencial del reparto modal”. Fuente: cartografías del Observatorio del Transporte de Mercancías por Ferrocarril, el Ministerio de Fomento y la Unión Europea

VARIABLE	DISTANCIA A UN CORREDOR PRINCIPAL DE PASAJEROS	NÚMERO DE PASAJEROS EN EL CORREDOR	IMD EN LAS CARRETERAS DEL ENTORNO	DISTANCIA A LOS CORREDORES DE LA RED TEN-T
Cómo se mide	Demanda de circulaciones para mercancías del corredor ferroviario más cercano (circulaciones/día) - mejor cuanto mayor	Demanda de circulaciones para viajeros del corredor ferroviario más cercano (circulaciones/día) - mejor cuanto menor	Demanda del corredor de carreteras más cercanos (IMD de pesados) - mejor cuanto menor	Distancia a los corredores prioritarios de la red TEN-T (estimación cualitativa) - mejor cuanto menor
MCAS				
Antequera	14.00	312.00	3891.00	10.00
Santander-Ebro	71.00	1736.00	20460.00	5.00
Azuqueca	36.00	983.00	16094.00	10.00
La Robla	53.00	625.00	5871.00	10.00
T. de los Vados	27.00	251.00	11879.00	5.00
Villafría	63.00	611.00	22388.00	0.00
Venta de Baños	116.00	1319.00	11287.00	10.00
M. de Lemos	33.00	384.00	942.00	10.00
Coslada	54.00	800.00	23932.00	10.00
Abroñigal	83.00	2905.00	56638.00	10.00
SCAS				
Antequera	8.60	8.93	9.61	10.00
Santander-Ebro	2.90	4.02	7.95	5.00
Azuqueca	6.40	6.62	8.39	10.00
La Robla	4.70	7.85	9.41	10.00
T. de los Vados	7.30	9.14	8.81	5.00
Villafría	3.70	7.90	7.76	0.00
Venta de Baños	0.00	5.46	8.87	10.00
M. de Lemos	6.70	8.68	9.91	10.00
Coslada	4.60	7.25	7.61	10.00
Abroñigal	1.70	0.00	4.34	10.00

6.2.3. Cuestionario DELPHI

Para obtener los pesos de los factores se realiza un cuestionario DELPHI. La idoneidad de esta técnica radica en su capacidad para alcanzar consensos en un grupo de expertos de muy diferentes especialidades, algo importante en un problema multidisciplinar como el expuesto en esta Tesis Doctoral.

El panel incluye a más de 90 expertos en las diferentes disciplinas que concurren en el problema de evaluación de la localización de los puertos secos: logística, sostenibilidad, impacto ambiental, economía, transporte y geografía. Los 60 expertos que respondieron las dos rondas del cuestionario provienen además de ámbitos muy diversos como son: empresas privadas/consultoras, empleados de la administración e investigadores, con el objetivo de poseer un grupo lo más heterogéneo posible relacionados directamente con el tema a tratar. La composición del panel de expertos se muestra en la Figura 27. Con esta selección se busca que los pesos obtenidos sean lo más representativos posibles.

Figura 27. Composición del panel de expertos para el cuestionario DELPHI. Fuente: elaboración propia

El cuestionario del DELPHI consta de dos rondas o lanzamientos. El documento enviado en cada ronda al panel de expertos se recoge en los Anexos 2 (Primer lanzamiento) y 3 (Segundo lanzamiento).

➤ Primer lanzamiento

En la primera ronda se les envía a los expertos un cuestionario en el cual se les explica en qué consiste la investigación, los factores a tener en cuenta para su evaluación y cómo rellenar el estadillo.

En la segunda columna del estadillo (Peso 1ª ronda) deben otorgar un peso a cada uno de los factores en función de la importancia que, a su juicio, tienen para evaluar la calidad de las localizaciones de los puertos secos existentes actualmente en España. Estos pesos pueden oscilar entre 1 y 10, siendo 1 “*nada importante*” y 10 “*imprescindible*”. Se les pide además que respondan con números naturales con el objetivo de acelerar el consenso (dado que así se discretiza y se reduce el número de posibles soluciones) y poder realizar de este modo sólo dos lanzamientos, con la consiguiente reducción del número de abandonos. Esta reducción del número de lanzamientos resulta válida a pesar de que la formulación teórica del método DELPHI propiamente dicho comprende varias etapas sucesivas de envíos de cuestionarios, de vaciado y de explotación, dado que la experiencia de Rowe y Wright (2001) demuestra esta limitación no afecta a la calidad de los resultados.

En la tercera columna del estadillo (Orden de importancia), los expertos deben ordenar de 1º a 17º los factores, de forma que 1º sea el factor que consideran más importante, 2º el segundo factor que consideran más importante y así sucesivamente hasta el 17º factor. La información aportada en esta tercera columna permite obtener una clasificación, ya que los expertos revelan su preferencia entre dos factores a los que se les otorga el mismo peso de ponderación.

Se resumen a continuación los principales resultados del análisis descriptivo de las respuestas del primer lanzamiento, los cuales se acompañan con la pertinente explicación sobre las técnicas estadísticas empleadas y una somera discusión acerca de los mismos.

Para realizar el análisis descriptivo de los datos se utilizan 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.

La media aritmética es el valor característico de una serie de datos cuantitativos objeto de estudio que parte del principio de la esperanza matemática o valor esperado. Se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos: $\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$.

La mediana representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados

Sean $x_1, x_2, \dots, x_n$ los datos de una muestra ordenada en orden creciente y designando la mediana como Me , distinguimos dos casos:

a) Si n es impar, la mediana es el valor que ocupa la posición $\frac{n+1}{2}$ una vez que los datos han sido ordenados (en orden creciente o decreciente), porque éste es el valor central. Es decir:

$$Me = x_{\frac{n+1}{2}}.$$

b) Si n es par, la mediana es la media aritmética de los dos valores centrales. Es decir:

$$Me = \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}}{2}.$$

Se selecciona asimismo el rango intercuartílico como medida de la dispersión de los datos. Éste se define como la diferencia entre el tercer cuartil (Q_3) y el primer cuartil (Q_1). Es decir, $RI = Q_3 - Q_1$. Este valor se utiliza como medida del consenso alcanzado ya que ofrece una idea muy intuitiva de la desviación de los datos respecto de la mediana.

La Tabla 21 condensa la información sobre estas medidas de tendencia central y de desviación para los resultados de la primera fase.

Tabla 21. Resultados del primer lanzamiento del cuestionario DELPHI

NOMBRE DEL FACTOR	CÓDIGO	$\bar{x}$	Me	Q_1	Q_3	RI
Impacto sobre el medio natural	imp_nat	6.44	7	5.00	8.00	3.00
Impacto sobre el medio urbano	imp_urb	6.61	7	6.00	8.00	2.00
Afección hidrológica	hydro	5.69	6	4.00	7.00	3.00
Precio del suelo	land_pri	6.81	7	5.50	9.00	3.50
Crecimiento potencial de la demanda	dem_gro	7.61	8	7.00	9.00	2.00
Rango del municipio de acogida	mun_ran	4.88	5	3.00	6.50	3.50
Accesibilidad a la red ferroviaria	acc_rail	8.88	10	8.00	10.00	2.00
Accesibilidad a las principales carreteras de alta capacidad	acc_road	8.46	9	7.00	10.00	3.00
Accesibilidad a aeropuertos	acc_air	5.58	5	4.00	7.00	3.00
Accesibilidad a puertos marítimos	acc_port	9.05	10	8.00	10.00	2.00
Accesibilidad a la dotación de suministros y servicios	acc_sup	6.97	7	5.00	8.00	3.00
Clima	wea	3.19	3	1.50	4.50	3.00
Orografía	orog	5.10	5	3.00	6.50	3.50
Geología	geol	3.85	3	2.00	6.00	4.00
Relación con otras plataformas logísticas	rel_plat	7.58	8	6.50	8.50	2.00
Integración en los principales corredores	sup_cha	8.02	8	7.50	10.00	2.50
Optimización potencial del reparto modal	mod_shi	7.08	7	6.00	8.00	2.00

Como apoyo gráfico a esta tabla, permitiendo así un mejor entendimiento de la distribución de las respuestas, se representan “*diagramas de cajas y bigotes*” para cada uno de los factores. Un “*diagrama de cajas y bigotes*” (también “*box and whiskers*” o *boxplot*) es un gráfico, basado en cuartiles, mediante el cual se visualiza un conjunto de datos. Está compuesto por un rectángulo, la “*caja*”, y dos brazos, los “*bigotes*”, tal como se expone en el siguiente esquema:

Figura 28. Esquema de un diagrama de cajas y bigotes genérico

Este gráfico suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q_1 , Q_2 (que coincide con la mediana) y Q_3 , y una visión general de la simetría de la distribución de los datos y permiten localizar la presencia de outliers (datos atípicos).

Figura 29. Diagramas de cajas y bigotes del primer lanzamiento del cuestionario DELPHI

Como puede apreciarse en la Figura 29, en esta primera ronda existe un consenso prácticamente total en la necesidad de los puertos secos de ser accesibles por ferrocarril y carretera, así como de una buena comunicación con los puertos marítimos. También existe cierto acuerdo en la importancia de los factores relativos al impacto sobre el medio natural y urbano, el precio del suelo, el crecimiento potencial de la demanda, la disponibilidad de servicios y dota-

ciones, la relación que tiene el puerto seco con otras plataformas logísticas, la integración en los principales corredores de mercancías y el reequilibrio del reparto modal. En el resto de variables, el rango intercuartílico demuestra que existe cierta dispersión en las respuestas. Además, todas ellas presentan una importancia menor de acuerdo a las opiniones vertidas por el panel de expertos.

➤ Segundo lanzamiento

Tras realizar el análisis descriptivo de la información aportada en la primera ronda del cuestionario por todos los expertos que componen el panel del DELPHI, se realiza un segundo lanzamiento. En él, se les muestran a los expertos los principales resultados del análisis descriptivo de la muestra de respuestas del primer lanzamiento.

En esta segunda ronda, los expertos deben rellenar una única columna del estadillo correspondiente, otorgando a cada variable un peso. Una vez más, estos pesos pueden oscilar entre 1 y 10, siendo 1 “*nada importante*” y 10 “*imprescindible*” y la respuesta debe ser un número natural. El peso otorgado puede ser el mismo que propusieron en la primera ronda o diferente si consideran que su opinión puede variar a la vista de los resultados que se adjuntan en el cuestionario. El objetivo con este segundo lanzamiento es reducir el rango intercuartílico del conjunto de respuestas o, lo que es lo mismo, conseguir el consenso entre los expertos, a fin de poner de manifiesto convergencias de opiniones.

La información del segundo lanzamiento se trata igual que la del primero: se calculan la media aritmética, la mediana y el rango intercuartílico. Asimismo, se representan los diagramas de cajas y bigotes de cada factor. Los resultados se muestran en la Tabla 22 y en la Figura 30. Estos resultados se acompañan con las comparativas entre los resultados del primer lanzamiento y el segundo, así como una somera discusión sobre los resultados obtenidos. Los pesos utilizados en el *algoritmo de evaluación* se corresponden con la columna *Me* de la Tabla 22.

Tabla 22. Resultados del segundo lanzamiento del cuestionario DELPHI

NOMBRE DEL FACTOR	CÓDIGO	$\bar{x}$	Me	Q ₁	Q ₃	RI
Impacto sobre el medio natural	imp_nat	5.54	6.00	5.00	6.00	1.00
Impacto sobre el medio urbano	imp_urb	6.86	7.00	6.00	7.50	1.50
Afección hidrológica	hydro	5.95	6.00	5.00	6.50	1.50
Precio del suelo	land_pri	6.90	7.00	6.00	7.00	1.00
Crecimiento potencial de la demanda	dem_gro	7.37	8.00	7.00	8.00	1.00
Rango del municipio de acogida	mun_ran	5.14	5.00	5.00	6.00	1.00
Accesibilidad a la red ferroviaria	acc_rail	9.75	10.00	10.00	10.00	0.00
Accesibilidad a las principales carreteras de alta capacidad	acc_road	9.08	9.00	9.00	9.54	0.54
Accesibilidad a aeropuertos	acc_air	5.51	6.00	5.00	7.00	2.00
Accesibilidad a puertos marítimos	acc_port	9.51	10.00	9.00	10.00	1.00
Accesibilidad a la dotación de suministros y servicios	acc_sup	7.86	8.00	7.50	8.00	0.50
Clima	wea	3.42	3.00	3.00	4.00	1.00
Orografía	orog	5.41	5.00	4.00	6.00	2.00
Geología	geol	4.31	4.00	3.00	5.00	2.00
Relación con otras plataformas logísticas	rel_plat	7.47	8.00	7.00	8.00	1.00
Integración en los principales corredores	sup_cha	6.00	6.00	5.00	6.00	1.00
Optimización potencial del reparto modal	mod_shi	5.95	6.00	5.50	7.00	1.50

Figura 30. Diagramas de cajas y bigotes del segundo lanzamiento del cuestionario DELPHI

Los factores a los que se da mayor importancia son los relacionados con la accesibilidad territorial, presentando además un consenso prácticamente total. En concreto los factores considerados más importantes por el panel de expertos son: “Accesibilidad a la red ferroviaria”, “Accesibilidad a las principales carreteras de alta capacidad” y “Accesibilidad a los puertos marítimos”.

Sin embargo, a la “Accesibilidad a aeropuertos” apenas se le da importancia. Es, además, uno de los factores en los que menos acuerdo existe entre los expertos tras la segunda ronda, junto con la “Orografía” y la “Geología”. Esto se debe a que el transporte aéreo es una modalidad de transporte de mercancías aún muy poco utilizada actualmente y extremadamente especializa-

da en el transporte urgente, de mercancías rápidamente perecederas (flores, prensa, etc) y animales vivos. Sin embargo, las últimas tendencias en el sector del transporte aéreo de mercancías apuntan hacia una importancia creciente del mismo tanto a nivel internacional como nacional. Además, en el caso de España, esta repercusión puede ser mayor por su situación periférica en la Unión Europea y su necesidad de transporte hacia y desde las Islas Canarias y Baleares. Como el transporte de carga aérea comparte, en muchos casos, vehículo con el transporte de pasajeros para aumentar el aprovechamiento de las bodegas y aumentar el margen de beneficios de las compañías aéreas, es necesario que la mercancía realice su paso por el aeropuerto lo más rápido posible para no interferir en los horarios del transporte de pasajeros. A este respecto, la posibilidad que presentan los puertos secos para realizar en ellos el despacho de aduanas, aporta una oportunidad de captación de tráfico de carga aérea pero exige que se garantice en los mismos el sellado automático de las unidades de carga para asegurar que la mercancía no han sufrido manipulación y puedan superar los intensos controles de seguridad de las terminales de carga aérea (Comisión europea, 2011). Los resultados obtenidos corroboran la desconfianza del panel de expertos por esta posibilidad.

Los mayores consensos se obtienen en los factores *“Accesibilidad a la red ferroviaria”*, *“Accesibilidad a la dotación de suministros y servicios”* y *“Accesibilidad a las principales carreteras de alta capacidad”*.

Los resultados obtenidos confirman la posibilidad que ofrecen los puertos secos de potenciar la eficiencia en el uso de los modos de transporte tanto individualmente como en el marco de una integración intermodal para alcanzar una utilización de recursos óptima y sostenible que pasa por un reequilibrio modal que aumente la contribución del ferrocarril en el transporte de mercancías. En consecuencia, la ubicación del puerto seco es un factor que determina en gran medida el éxito del trasvase de mercancía de la carretera al ferrocarril que es una de las políticas de transporte prioritaria de la UE.

Por el contrario, el factor al que menos importancia se le otorga es el *“Clima”*. Sin duda alguna, esto se debe a que al aplicarse al caso español, la bondad del clima del país lleva a pensar que éste no afectará a la operativa. Cabe pensar que el problema planteado en otro entorno podría modificar el peso del factor.

Un resultado sorprendente del estudio es que al *“Impacto sobre el medio natural”* se le suponga una importancia menor que al *“Impacto sobre el medio urbano”* dado que la legislación de

la mayoría de los países limita más el impacto en zonas medioambientalmente protegidas que en ciudades.

Cabe destacar que, aunque los resultados del cuestionario revelan una mayor importancia a la hora de evaluar la calidad de 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 importancia que tiene cada factor en la calidad de la localización de puertos secos y ha permitido un resultado muy equilibrado entre los diferentes puntos de vista que presentan profesionales de diferentes especialidades y ámbitos de trabajo.

Como puede apreciarse en la Figura 30, en realidad, la falta de consenso en algunos de los factores responde, no tanto a una resistencia de los expertos a cambiar sus pesos sino, sobre todo, a la presencia de outliers muy apartados de la mediana (representan posiciones extremas y enconadas), que alteran mucho el valor del rango intercuartílico. Además, la presencia de estos datos atípicos se explica en todos los casos por la especialidad de los expertos. Del estudio en detalle del panel de experto se aprecia que los especialistas en temas relacionados con el medio ambiente y la sostenibilidad han sido en el estudio los más reticentes a cambiar su opinión sobre el *“Impacto en el medio natural”* o sobre la *“Orografía”* y la *“Geología”*, debido al coste medioambiental que supone el movimiento de tierras.

En la Tabla 23 se pone en evidencia que los rangos intercuartílicos que presentan una mayor disminución entre la primera ronda y la segunda son los de los factores *“Precio del suelo”*, *“Rango del municipio de acogida”* y *“Accesibilidad a la dotación de suministros y servicios”*. Por contra, los que menos se reducen son los de *“Impacto en el medio urbano”*, *“Optimización potencial del reparto modal”*, *“Crecimiento potencial de la demanda”*, *“Accesibilidad a aeropuertos”*, *“Accesibilidad a puertos marítimos”* y *“Relación con otras plataformas logísticas”*.

Tabla 23. Variaciones producidas entre las respuestas del primer lanzamiento y del segundo

NOMBRE DEL FACTOR	CÓDIGO	VARIACIÓN					
		$\bar{x}$	Me	Q ₁	Q ₃	RI	
Impacto sobre el medio natural	imp_nat	▼ -0.90	▼ -1.00	▼ 0.00	▼ -2.00	▼ -2.00	
Impacto sobre el medio urbano	imp_urb	▲ 0.25	▼ 0.00	▼ 0.00	▼ -0.50	▼ -0.50	
Afección hidrológica	hydro	▲ 0.25	▼ 0.00	▲ 1.00	▼ -0.50	▼ -1.50	
Precio del suelo	land_pri	▲ 0.08	▼ 0.00	▲ 0.50	▼ -2.00	▼ -2.50	
Crecimiento potencial de la demanda	dem_gro	▼ -0.24	▼ 0.00	▼ 0.00	▼ -1.00	▼ -1.00	
Rango del municipio de acogida	mun_ran	▲ 0.25	▼ 0.00	▲ 2.00	▼ -0.50	▼ -2.50	
Accesibilidad a la red ferroviaria	acc_rail	▲ 0.86	▼ 0.00	▲ 2.00	▼ 0.00	▼ -2.00	
Accesibilidad a las principales carreteras de alta capacidad	acc_road	▲ 0.63	▼ 0.00	▲ 2.00	▼ -0.46	▼ -2.46	
Accesibilidad a aeropuertos	acc_air	▼ -0.07	▲ 1.00	▲ 1.00	▼ 0.00	▼ -1.00	
Accesibilidad a puertos marítimos	acc_port	▲ 0.46	▼ 0.00	▲ 1.00	▼ 0.00	▼ -1.00	
Accesibilidad a la dotación de suministros y servicios	acc_sup	▲ 0.90	▲ 1.00	▲ 2.50	▼ 0.00	▼ -2.50	
Clima	wea	▲ 0.24	▼ 0.00	▲ 1.50	▼ -0.50	▼ -2.00	
Orografía	orog	▲ 0.31	▼ 0.00	▲ 1.00	▼ -0.50	▼ -1.50	
Geología	geol	▲ 0.46	▲ 1.00	▲ 1.00	▼ -1.00	▼ -2.00	
Relación con otras plataformas logísticas	rel_plat	▼ -0.10	▼ 0.00	▲ 0.50	▼ -0.50	▼ -1.00	
Integración en los principales corredores	sup_cha	▼ -2.02	▼ -2.00	▼ -2.50	▼ -4.00	▼ -1.50	
Optimización potencial del reparto modal	mod_shi	▼ -1.14	▼ -1.00	▼ -0.50	▼ -1.00	▼ -0.50	

En esta tabla, se aprecia un importante descenso de los rangos intercuartílicos de todas las variables. Los valores de estos rangos en la segunda ronda son suficientemente buenos como para parar aquí el proceso de consulta a los expertos. Asimismo, pueden verificarse las desviaciones producidas sobre la media y la mediana entre los resultados obtenidos en la primera ronda y los de la segunda. Las variaciones producidas en la media aritmética de los pesos de los factores significan que la mayoría de los expertos ha ajustado en la segunda ronda su decisión en base a la información recibida con el análisis de los datos de la primera ronda. Sin embargo, la mediana permanece constante en casi todos los factores y sólo varía sensiblemente (por encima de 1 unidad) para el factor “*Integración en los principales corredores*”, algo que esperábamos dada la robustez de este estadístico.

Si analizamos los resultados agregados para el conjunto de respuestas se comprueba que existe un ajuste de la media, la mediana y el rango intercuartílico globales del conjunto de respuestas. En este análisis vemos que el único dato atípico lo presenta el rango intercuartílico del factor “*Accesibilidad a la red ferroviaria*” en el segundo lanzamiento, dado que el consenso obtenido es pleno.

Figura 31. Variación de los estadísticos agregados entre el primer y segundo lanzamientos del cuestionario DELPHI

En este punto, se quiere hacer notar que es necesario que el máximo número de expertos respondan cada una de las fases. En el caso de esta Tesis Doctoral, eliminando los cuestionarios que no resultaron válidos en la primera ronda, se obtuvieron 74 respuestas (un 82,2% de todas las posibles); en la segunda fase, 60 respuestas (un 66,7% de todas las posibles respuestas y un 81,1% de las válidas tras la primera ronda). Por eso, el que el consenso se alcance en esta segunda es un resultado muy positivo, dado que la sucesión de lanzamientos va reduciendo la participación de los expertos.

6.2.4. Modelo bayesiano

Para obtener los pesos de las variables se trabaja con un modelo bayesiano que permite clasificar la importancia de las variables que influyen en la calidad de la localización de los puertos secos. Para ello, es necesario construir una Red Bayesiana. Esta construcción se realiza mediante el empleo del algoritmo basado en la optimización de una medida $K2$, que se presenta en el apartado 4.2.2., siguiendo rigurosamente la metodología descrita en el apartado 4.2.1.

A partir de los $SCAS_{ik}$ de cada una de las 40 variables y partiendo de que cada variable tiene como importancia de partida el peso del factor al que está asociada de acuerdo a la estructura anidada, el algoritmo construye una primera estructura. En esta “pre-red”, el algoritmo $K2$ comienza asumiendo que ningún nodo tiene padres y comienza a buscar el conjunto de padres que maximiza el gradiente $g(i, Pa_i)^{14}$. En cada paso, el algoritmo añade aquellos arcos al grafo que, de manera incremental, incrementan el valor de $g(i, Pa_i)$. Este proceso se representa, para su mejor comprensión en la Figura 32.

¹⁴ Se recuerda que la expresión completa de este gradiente se presenta en la Ecuación 2.

Figura 32. Esquema de funcionamiento del algoritmo K2

A los 40 nodos correspondientes a las 40 variables se les añade un nodo más el LQR_i calculado tomando como pesos de las variables los pesos de su factor asociado en la estructura anidada. Esta variable va ajustando su valor de acuerdo a los nuevos pesos. De este modo es posible conocer las relaciones que establece con las demás variables en términos de causalidad (causa y efecto, establecimiento de padres e hijos, etc) y establecer un valor de comparación para emplear en el análisis de sensibilidad que se realiza sobre la estructura final de la red. De este modo, además de obtener la Red Bayesiana se evalúa su robustez. Huelga decir que esta variable queda fuera de la posterior ponderación, dado que es una variable dependiente y las únicas variables a ponderar en el *algoritmo de evaluación* deben ser las variables independientes.

De este modo, se estudian las relaciones en el conjunto de la red variable a variable. La variable padre de la red es *DNS* (Distancia a espacios naturales), dado que ningún arco entra en ella pero varios salen desde ella. Esta variable se corresponde con la máxima importancia (Estrato 1). De ella “*cuelgan*” una serie de variables hijo, pero no todas tienen el mismo nivel de importancia. Esto es debido a que la variable *NIS* (Número de espacios aislados) es la única que sólo depende de *DNS*, pero otras variables dependen a su vez de otras variables que se sitúan por debajo en la red. Es importante señalar, pues, que el estrato depende del número de arcos que hay que recorrer para alcanzar a la variable *DNS*, pero también son importantes las relaciones de dependencia que cada variables establece con las demás. Siguiendo este planteamiento, se

establece un orden de importancia que depende de la profundidad de cada variable en la red, obteniéndose los estratos presentados en la Tabla 24.

Tabla 24. 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	DAHCH	NMDLP	SL		NRADT	DFA
			CS	LP	IPI	DPFC	LQR	DHCR	WF			QR
			EX		DPPC	CV		NL	DP			CSS
			IRE		NPT	TC						
						NRA						
						DA						
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		

Una vez reunida la información de la profundidad de cada variable en la red y asignada a cada una de ellas un estrato de acuerdo a esa profundidad, se otorga a la variable padre de la red un peso de ponderación $W_{\bar{k}, \text{estrato } 1} = W_{DNS} = 10$ y a las variables del estrato 11 un peso de ponderación $W_{\bar{k}, \text{estrato } 11} = 1$. Estableciendo una correspondencia entre el estrato y la importancia, el resto de pesos de ponderación se calculan mediante una interpolación lineal. En la última fila de la Tabla 24 se presentan los pesos que se asignan a cada una de las variables.

Por último, las variables descolgadas (aquellas que no establecen relaciones con ninguna otra variable), reciben un peso de ponderación $W_{\bar{k}, \text{descolgadas}} = 0$. El hecho por el que quedan descolgadas es que, al tratarse de puertos secos ya construidos o en fases muy avanzadas del proyecto a fecha de 31 de diciembre de 2012, todas las localizaciones tienen valores prácticamente iguales en ellas. De este modo, el algoritmo K2 no puede establecer el orden de preferencia entre los elementos de la muestra. Sin embargo, no deben dejar de ser consideradas, puesto que su supresión condiciona las relaciones que se establecen en la Red Bayesiana y, por tanto, su estructura final. Además, para evaluaciones futuras o para otros conjuntos de localizaciones, estos valores podrán no ser tan similares, produciendo que se establezcan relaciones con otras variables y dejando así de quedar descolgadas.

De acuerdo a los resultados obtenidos, las variables más importantes son las que se engloban dentro de la categoría medioambiental. Les siguen en importancia las variables socioeconómicas. En tercer lugar, las que están relacionadas con la accesibilidad de las localizaciones. Y, por último, las variables incluidas en la categoría de Localización.

Esto contradice en cierta medida los resultados obtenidos en el cuestionario DELPHI, dado que la Red Bayesiana otorga unos pesos de ponderación más importantes a las variables relacionadas con los factores que tradicionalmente no se han incluido en las evaluaciones de la calidad de las localizaciones de instalaciones industriales.

En la Tabla 25 se muestra la importancia de cada variable combinando su peso de ponderación con el correspondiente peso de ponderación de su factor asociado en la estructura anidada. El peso conjunto $\varpi = w_k \cdot W_{\bar{k}}$ representa la importancia que tiene cada binomio variable-factor en el algoritmo de evaluación. Para conocer la importancia relativa de cada binomio, se sitúa cada uno en el tramo entre cuartiles que le corresponde.

La mediana de importancias corresponde a las variables *DA* (Distancia a aeropuertos) y *DPFC* (Distancia a un corredor principal de mercancías). La variable *IRE* (Importancia de la red ferroviaria en el entorno) presenta el único valor atípico, dado que supera el límite superior $L_s = Q_3 + 1,5 \cdot RI = 60,58$. Ninguna variable tiene una importancia atípicamente baja.

Se comprueba así que la triangulación de técnicas permite reducir la arbitrariedad del modelo de evaluación y equilibrar la importancia de unas variables que en la literatura científica se consideran importantes pero cuyo estudio no ha tenido un reflejo en la planificación de la localización de los actuales puertos secos.

Tabla 25. Recopilación de los pesos de ponderación de los factores y de las variables que influyen en la calidad de la localización de los puertos secos

CATEGORÍA	FACTOR	w_k	VARIABLE	$W_{\bar{k}}$	$w = w_k \cdot W_{\bar{k}}$	CUARTIL
FACTORES MEDIOAMBIENTALES	imp_nat	6.00	DNS	10.00	60.00	$w > Q_3 \cap w \leq Q_4$
			CNE	0.00	0.00	$w \leq Q_1$
			NIS	9.10	54.60	$w > Q_3 \cap w \leq Q_4$
			DFA	0.00	0.00	$w \leq Q_1$
	imp_urb	7.00	DUS	8.20	57.40	$w > Q_3 \cap w \leq Q_4$
			CUE	8.20	57.40	$w > Q_3 \cap w \leq Q_4$
	hydro	6.00	DSW	7.30	43.80	$w > Q_2 \cap w \leq Q_3$
			FL	7.30	43.80	$w > Q_2 \cap w \leq Q_3$
			GP	6.40	38.40	$w > Q_2 \cap w \leq Q_3$
FACTORES SOCIOECONÓMICOS	land_pri	7.00	LP	7.30	51.10	$w > Q_3 \cap w \leq Q_4$
	dem_gro	8.00	IPI	6.40	51.20	$w > Q_3 \cap w \leq Q_4$
			GDP	5.50	44.00	$w > Q_2 \cap w \leq Q_3$
			EL	6.40	51.20	$w > Q_3 \cap w \leq Q_4$
	mun_ran	5.00	PL	4.60	23.00	$w > Q_1 \cap w \leq Q_2$
			PD	5.50	27.50	$w > Q_1 \cap w \leq Q_2$
FACTORES DE ACCESIBILIDAD	acc_rail	10.00	NRA	5.50	55.00	$w > Q_3 \cap w \leq Q_4$
			IRE	8.20	82.00	$*(w \gg L_s = Q_3 + 1,5 \cdot RI)$
			CD	5.50	55.00	$w > Q_3 \cap w \leq Q_4$
			QR	0.00	0.00	$w \leq Q_1$
	acc_road	9.00	DAHNCN	4.60	41.40	$w > Q_2 \cap w \leq Q_3$
			DHCR	3.70	33.30	$w > Q_2 \cap w \leq Q_3$
			NL	3.70	33.30	$w > Q_2 \cap w \leq Q_3$
	acc_air	6.00	DA	5.50	33.00	$w = Q_2$
	acc_port	10.00	DP	2.80	28.00	$w > Q_1 \cap w \leq Q_2$
	acc_sup	8.00	CSS	0.00	0.00	$w \leq Q_1$
FACTORES DE LOCALIZACIÓN	wea	3.00	CV	5.50	16.50	$w > Q_1 \cap w \leq Q_2$
			RL	2.80	8.40	$w \leq Q_1$
			WF	2.80	8.40	$w \leq Q_1$
	orog	5.00	TC	5.50	27.50	$w > Q_1 \cap w \leq Q_2$
			SL	2.80	14.00	$w \leq Q_1$
	geol	4.00	EX	8.20	32.80	$w > Q_1 \cap w \leq Q_2$
			CS	8.20	32.80	$w > Q_1 \cap w \leq Q_2$
	rel_plat	8.00	NNLP	1.90	15.20	$w \leq Q_1$
			NMDLP	3.70	29.60	$w > Q_1 \cap w \leq Q_2$
			BICA	1.00	8.00	$w \leq Q_1$
	sup_cha	6.00	DPFC	5.50	33.00	$w = Q_2$
	mod_shi	6.00	DPPC	6.40	38.40	$w > Q_2 \cap w \leq Q_3$
			NPT	6.40	38.40	$w > Q_2 \cap w \leq Q_3$
			NRADT	1.00	6.00	$w \leq Q_1$
			DTENT	3.70	22.20	$w > Q_1 \cap w \leq Q_2$

6.2.5. Análisis de la información geográfica

Una vez obtenidos los pesos de ponderación de los 17 factores (w_k) y las 40 variables ($W_{\bar{k}}$), que se recopilan en la Tabla 25, así como los *Standardised Criteria Assessment Score* ($SCAS_{ik}$), recogidos entre las Tablas 4 a 20 y cuya codificación se puede consultar en el Anexo 4 es posible aplicar el *algoritmo de evaluación* con el objetivo de analizar la información geográfica. Las salidas de pantalla de la aplicación del *algoritmo de evaluación* se recogen en el Anexo 5, ordenadas por categorías, incluyendo tablas y cartografía.

Mediante el análisis de la información geográfica se realizan dos evaluaciones diferentes: 1) por un lado, se evalúa la sostenibilidad de las localizaciones. Para ello, se aplica el *algoritmo de evaluación* activando únicamente las variables que se corresponden a las categorías medioambiental y socioeconómica. 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. De este modo, se pueden añadir a la evaluación las variables de la categoría de localización asociadas al factor “*Optimización potencial del reparto modal*” para tener en cuenta no sólo la sostenibilidad de la propia localización sino también la mejora que supone en la sostenibilidad de la cadena logística; 2) por otro, se evalúa la calidad global de las localizaciones mediante la inclusión de las 40 variables.

➤ Evaluación de la sostenibilidad de las localizaciones

Aplicando el *algoritmo de evaluación* a las categorías medioambiental y socioeconómica se obtienen los *resultados parciales del Location Quality Rate* ($PLQR_c$) correspondientes a las mismas. Los resultados detallados para cada variable se pueden consultar en el Anexo 5, así como las cartografías resultantes.

Tabla 26. Resultados parciales del *Location Quality Rate* para las categorías medioambiental y socio-económica y para el factor "Optimización potencial del reparto modal"

PUERTO SECO	$PLQR_{MA}$	$PLQR_{Max,MA}$	% MA	POSICIÓN MA
Antequera	1087.45	3554.00	30.60	5
Santander-Ebro	551.65		15.52	10
Azuqueca	888.90		25.01	7
La Robla	1233.97		34.72	3
Toral de los Vados	1900.72		53.48	2
Villafraía	1174.43		33.05	4
Venta de Baños	1007.46		28.35	6
Monforte de Lemos	1955.74		55.03	1
Coslada	755.13		21.25	8
Abroñigal	600.82		16.91	9
PUERTO SECO	$PLQR_{SE}$	$PLQR_{Max,SE}$	% SE	POSICIÓN SE
Antequera	1258.06	2480.00	50.73	7
Santander-Ebro	1668.04		67.26	3
Azuqueca	1255.08		50.61	8
La Robla	1679.90		67.74	2
Toral de los Vados	1654.20		66.70	4
Villafraía	1763.30		71.10	1
Venta de Baños	1619.88		65.32	5
Monforte de Lemos	1605.72		64.75	6
Coslada	1195.71		48.21	9
Abroñigal	1195.71		48.21	9
PUERTO SECO	$PLQR_{MS}$	$PLQR_{Max,MS}$	% MS	POSICIÓN MS
Antequera	952.66	1050.00	90.73	1
Santander-Ebro	424.61		40.44	9
Azuqueca	772.16		73.54	4
La Robla	760.34		72.41	5
Toral de los Vados	795.01		75.72	3
Villafraía	491.88		46.85	7
Venta de Baños	484.87		46.18	8
Monforte de Lemos	871.96		83.04	2
Coslada	722.53		68.81	6
Abroñigal	313.30		29.84	10

Leyenda. MA: categoría medioambiental; SE: categoría socioeconómica; MS: factor "Optimización potencial del reparto modal".

En la Tabla 26 se resumen los resultados relevantes para la evaluación de la sostenibilidad de las localizaciones, agregando los resultados de las categorías medioambiental y socioeconómica y del factor *mod_shi* (Optimización potencial del reparto modal). Para cada categoría y para el factor *mod_shi* se calcula el $PLQR_c$ de cada localización sumando las calificaciones ponderadas de cada variable genérica a , de modo que: $PLQR_c = \sum(SCAS_{ia} \cdot w_a)$, donde w_a es el

producto de los pesos de cada variable y su factor correspondiente $\varpi_a = w_a \cdot W_{\bar{a}}$ ¹⁵. Este valor se compara con el $PLQR_{Max}$ de cada caso calculando el porcentaje obtenido sobre esta puntuación máxima, como $\%c = \left(\frac{PLQR_c}{PLQR_{Max}} \right) \cdot 100$. Por último, se establece la posición que cada localización ocupa para caso.

Para facilitar la comprensión de estos resultados, se representan en un diagrama de barras en cuyos ejes de abscisas y ordenadas se sitúan respectivamente las localizaciones y los porcentajes alcanzados en cada valoración.

Figura 34. Resultados parciales del *Location Quality Rate* para las categorías medioambiental y socioeconómica y para el factor "Optimización potencial del reparto modal"

A continuación, se combinan estos resultados para obtener los *Location Sustainability Rate* (LSR_i) de cada localización a través de la suma de los correspondientes $PLQR_c$. Se calculan dos valores, teniendo en cuenta o no los $PLQR_{MS}$ (los resultados parciales del *Location Quality Rate* correspondientes al factor "Optimización potencial del reparto modal"). Una vez más, estos valores se comparan con los $PLQR_{Max}$ y se le otorga a cada localización una posición.

¹⁵ Es necesario hacer notar que los pesos de ponderación utilizados en este caso deben ser los obtenidos del modelo bayesiano con las 40 variables y no sólo con las evaluadas, ya que si se omiten variables, la red se reordena y las relaciones que se establecen pasan a representar otro problema.

La Tabla 27 muestra estos resultados. En el primer caso, se calcula para el caso en que sólo se tienen en cuenta las variables correspondientes a las categorías medioambiental y socioeconómica. En el segundo (cuyos resultados se denotan con ' -símbolo “prima”- para distinguirlos de los anteriores), a estas variables se les añaden las correspondientes al factor *mod_shi*. La consideración o no de las variables al factor *mod_shi* supone pequeñas diferencias en el valor de comparación que toma el indicador *Location Sustainability Rate* (ver Figura 35), si bien ninguna localización varía tanto su puntuación respecto a las demás como para que se altere su posición en el ranking. Estas variaciones son, en todos los casos a la baja, lo que supone que estas localizaciones presentan una limitada captación de tráfico ferroviario.

Tabla 27. Resultados del *Location Sustainability Rate*

PUERTO SECO	LSR_i	LSR_{Max}	% SOSTENIBILIDAD	POSICIÓN SOSTENIBILIDAD
Antequera	2345.52	6034.00	38.87	6
Santander-Ebro	2219.69		36.79	7
Azuqueca	2143.98		35.53	8
La Robla	2913.86		48.29	4
Toral de los Vados	3554.93		58.91	2
Villafra	2937.74		48.69	3
Venta de Baños	2627.34		43.54	5
Monforte de Lemos	3561.46		59.02	1
Coslada	1950.84		32.33	9
Abroñigal	1796.53		29.77	10
PUERTO SECO	LSR'_i	LSR'_{Max}	% SOSTENIBILIDAD'	POSICIÓN SOSTENIBILIDAD'
Antequera	2345.52	7084.00	33.11	6
Santander-Ebro	2219.69		31.33	7
Azuqueca	2143.98		30.27	8
La Robla	2913.86		41.13	4
Toral de los Vados	3554.93		50.18	2
Villafra	2937.74		41.47	3
Venta de Baños	2627.34		37.09	5
Monforte de Lemos	3561.46		50.27	1
Coslada	1950.84		27.54	9
Abroñigal	1796.53		25.36	10

Figura 35. Diferencia entre los resultados de LSR_i y LSR'_i

En ambos casos, los mejores resultados corresponden a los puertos secos de Monforte de Lemos y Toral de los Vados, que son precisamente los puertos secos con mejores $PLQR_{MA}$, aunque ni si quiera estos superan el 60% de la puntuación máxima a obtener en la categoría medioambiental. Además, ambos tienen puntuaciones muy equilibradas en la categoría medioambiental.

Si sólo se tienen en cuenta la diferencia entre la calidad de Monforte de Lemos y Toral de los Vados es de un escaso 0,11% sobre la puntuación máxima. Esta diferencia se reduce cuando se tienen en cuenta también la puntuación en el factor mod_shi , pasando a ser de un 0,09% sobre la puntuación máxima.

El peor resultado lo obtiene en ambos supuestos el puerto seco de Abroñigal, dadas sus escasas puntuaciones en todos los apartados.

El resto de localizaciones se encuentran muy agrupadas en torno al valor de la mediana (41,21% para el LSR_i y 35,10% para el LSR'_i), lo que evidencia la escasa sostenibilidad de la mayor parte de las localizaciones de los puertos secos existentes en la actualidad.

➤ Evaluación de la calidad global de las localizaciones

Aplicando el *algoritmo de evaluación* a las 40 variables se obtienen los *Location Quality Rate* (LQR_i) de las 10 localizaciones. Los resultados detallados para cada variable se pueden consultar en el Anexo 5, así como las cartografías resultantes.

En la Tabla 28 se resumen los resultados agregados, ordenados según las cuatro categorías de la estructura anidada. Igual que en la anterior evaluación, para cada categoría se calcula el $PLQR_c$ de cada categoría para cada localización sumando las calificaciones ponderadas de cada variable genérica a , de modo que: $PLQR_c = \sum(SCAS_{ia} \cdot \varpi_a)$, donde ϖ_a es el producto de los pesos de cada variable y su factor correspondiente $\varpi_a = w_a \cdot W_{\bar{a}}$. Este valor se compara con el $PLQR_{Max}$ de cada caso calculando el porcentaje obtenido sobre esta puntuación máxima, como $\%C = \left(\frac{PLQR_c}{PLQR_{Max}} \right) \cdot 100$. Por último, se establece la posición que cada localización ocupa para caso.

Tabla 28. Resultados parciales del *Location Quality Rate* ordenados por categorías

PUERTO SECO	PLQR _{MA}	PLQR _{Max,MA}	% MA	POSICIÓN MA
Antequera	1087.45	3554.00	30.60	5
Santander-Ebro	551.65		15.52	10
Azuqueca	888.90		25.01	7
La Robla	1233.97		34.72	3
Toral de los Vados	1900.72		53.48	2
Villafraía	1174.43		33.05	4
Venta de Baños	1007.46		28.35	6
Monforte de Lemos	1955.74		55.03	1
Coslada	755.13		21.25	8
Abroñigal	600.82		16.91	9
PUERTO SECO	PLQR _{SE}	PLQR _{Max,SE}	% SE	POSICIÓN SE
Antequera	1258.06	2480.00	50.73	7
Santander-Ebro	1668.04		67.26	3
Azuqueca	1255.08		50.61	8
La Robla	1679.90		67.74	2
Toral de los Vados	1654.20		66.70	4
Villafraía	1763.30		71.10	1
Venta de Baños	1619.88		65.32	5
Monforte de Lemos	1605.72		64.75	6
Coslada	1195.71		48.21	9
Abroñigal	1195.71		48.21	9
PUERTO SECO	PLQR _{ACC}	PLQR _{Max,ACC}	% ACC	POSICIÓN ACC
Antequera	1973.20	3610.00	54.66	8
Santander-Ebro	1366.78		37.86	9
Azuqueca	2578.22		71.42	4
La Robla	2134.78		59.14	6
Toral de los Vados	2139.00		59.25	5
Villafraía	2674.76		74.09	3
Venta de Baños	2110.20		58.45	7
Monforte de Lemos	1233.00		34.16	10
Coslada	3184.18		88.20	2
Abroñigal	3294.40		91.26	1
PUERTO SECO	PLQR _{LOC}	PLQR _{Max,LOC}	% LOC	POSICIÓN LOC
Antequera	2272.11	3312.00	68.60	2
Santander-Ebro	1644.68		49.66	7
Azuqueca	1964.15		59.30	4
La Robla	1828.89		55.22	5
Toral de los Vados	1453.52		43.89	9
Villafraía	1630.59		49.23	8
Venta de Baños	1435.19		43.33	10
Monforte de Lemos	1756.28		53.03	6
Coslada	2597.91		78.44	1
Abroñigal	2166.50		65.41	3

Leyenda. MA: categoría medioambiental; SE: categoría socioeconómica; ACC: categoría accesibilidad; LOC: categoría localización

Estos resultados se representan en un diagrama de barras. Una vez más, en abscisas se sitúan las localizaciones y en ordenadas los porcentajes alcanzados en cada valoración.

Figura 36. Resultados parciales del Location Quality Rate ordenados por categorías

De estos resultados, cabe destacar que la puntuación de la categoría medioambiental es, en 9 de los 10 casos, la que presenta un menor porcentaje respecto al resto puntuaciones, siendo Monforte de Lemos la única excepción a esta tendencia (en este caso, su peor puntuación se da en la categoría de accesibilidad).

A continuación, se combinan estos resultados para obtener los *Location Quality Rate* (LQR_i) de cada localización a través de la suma de los correspondientes $PLQR_c$. Y, una vez más, se calculan los porcentajes obtenidos respecto del LQR_{Max} y se establece la posición que tiene cada puerto seco en el ranking de acuerdo a este porcentaje.

Tabla 29. Resultados finales del Location Quality Rate para cada puerto seco

PUERTO SECO	LQR_i	LQR_{Max}	% CALIDAD	POSICIÓN CALIDAD
Antequera	6590.83	12956.00	50.87	7
Santander-Ebro	5231.15		40.38	10
Azuqueca	6686.35		51.61	6
La Robla	6877.53		53.08	5
Toral de los Vados	7147.45		55.17	4
Villafra	7243.08		55.91	3
Venta de Baños	6172.73		47.64	9
Monforte de Lemos	6550.74		50.56	8
Coslada	7732.93		59.69	1
Abroñigal	7257.42		56.02	2

Las localizaciones que presentan una mayor calidad global son: Coslada (59,69%), Abroñigal (56,02%), Villafría (55,91%) y Toral de los Vados (55,17%). Como puede apreciarse, Coslada ocupa el primer puesto en calidad mientras sólo se situaba en el noveno lugar en la evaluación de la sostenibilidad; Abroñigal, el segundo en calidad y el décimo en sostenibilidad; Villafría el tercero en ambos casos; y Toral de los Vados, el cuarto en calidad y el segundo en sostenibilidad. Este “*sorpasso*” se debe a que Coslada y Abroñigal presentan unas puntuaciones mucho mayores que las del resto de localizaciones en las categorías de accesibilidad y localización, siendo Coslada la segunda mejor localización en accesibilidad (88,20%) y la mejor en localización (78,44%), mientras que Abroñigal es la mejor en accesibilidad (91,26%) y la tercera mejor en localización (65,41%).

Se reúnen en la Tabla 30 los valores máximo, mínimo, promedio y mediana de la calidad global y de las categorías medioambiental, socioeconómica, accesibilidad y localización.

Tabla 30. Estadísticos de los Location Quality Rate

	CA	% CA	MA	%	SE	%	ACC	%	LOC	%LOC
Máximo	7732.93	59.69	1955.74	55.0	1763.30	71.1	3294.40	91.2	2597.91	78.4
Mínimo	5231.15	40.3	551.6	15.5	1195.71	48.2	1233.00	34.1	1435.19	43.3
Media aritmética	6749.02	52.09	1115.63	31.3	1489.56	60.1	2268.85	62.8	1874.98	56.6
Mediana	6781.94	52.35	1047.46	29.4	1612.80	65.0	2136.89	59.2	1792.59	54.1
Leyenda. CA: Calidad; MA: categoría medioambiental; SE: categoría socioeconómica; ACC: categoría accesibilidad; LOC: categoría localización										

La mayor parte de las localizaciones presentan puntuaciones de calidad global próximas a los valores medios y medianos del conjunto de puntuaciones, con un rango intercuartílico de tan sólo un 5,08%. Sólo destaca, a la baja, la diferencia de Santander-Ebro, que se desvía -11,72% respecto a la media aritmética y -11,97% respecto a la mediana (hay mayor variación en la comparación con la mediana porque, obviamente, la media aritmética se ve afectada por su propia presencia como dato atípico). Estos resultados demuestran la modesta calidad de las localizaciones de los puertos secos existentes en la actualidad.

Se analizan a continuación algunos de los motivos particulares que justifican los peores resultados de cada categoría, con el objetivo de que las futuras implantaciones no cometan errores similares:

- La mala puntuación de Santander-Ebro en la categoría medioambiental se debe, en gran medida, 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.

- El motivo para la mala puntuación de Abroñigal en la categoría medioambiental radica en que este puerto seco produce una gran fractura en el tejido urbano del sur de la ciudad de Madrid, en un área que no es propiamente industrial (pues, 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. Y aunque tiene quizá el acceso a infraestructuras ferroviarias más potente de las 10 localizaciones, éstas se encuentran supeditadas a los usos de pasajeros. Así, no es de extrañar que desde el año 2007 se esté planteando el desmantelamiento tanto de la instalación como el soterramiento de parte de las vías.
- Para el análisis de los resultados en la categoría socioeconómica se habla del concepto de “*equidad*”. Si se representa la sostenibilidad en una perspectiva axonométrica ortogonal trimétrica¹⁶ de ejes “*Calidad medioambiental*”, “*Calidad económica*” y “*Calidad social*” (ver Figura 37 para una mejor comprensión) y se proyectan las calificaciones de cada eje sobre el plano formado por los ejes “*Calidad económica*” y “*Calidad social*”, se obtiene la “*equidad*”¹⁷. Esto es lo que se ha calculado en la categoría socioeconómica, obteniendo que las localizaciones menos equitativas son Coslada y Abroñigal.

Figura 37. Perspectiva axonométrica ortogonal trimétrica en la que se representa la sostenibilidad de las localizaciones. Fuente: elaboración propia

¹⁶ El tipo de perspectiva viene determinado por el hecho de que cada eje tiene unos pesos de ponderación diferentes.

¹⁷ Además de este plano, existen los planos de “*viabilidad*”, formado por los ejes económico y medioambiental y de “*soportabilidad*”, formado por los ejes social y medioambiental.

Si se analizan las puntuaciones variable a variable, proyectando sobre los ejes “*Economía*” y “*Sociedad*” de la Figura 37, es posible evaluar qué parte de “*culpa*” tienen las puntuaciones puramente económicas y puramente sociales en estos malos resultados. La explicación en ambos casos es la misma, aunque con diferentes puntuaciones.

Desde el punto de vista económico, Coslada y Abroñigal presentan los precios del suelo más elevados, duplicando los valores de las siguientes localizaciones (Antequera y Santander-Ebro). Dado que esta variable, de tipo coste (mejor cuanto menor) presenta uno de los $\varpi_{\alpha} = w_{\alpha} \cdot W_{\bar{\alpha}}$ más altos, las diferencias se agrandan tras la aplicación del *algoritmo de evaluación*, de modo que estas localizaciones obtienen unas calificaciones en el entorno de un tercio de las obtenidas por Antequera y Santander-Ebro y la sexta parte de las mejores puntuaciones (que corresponden a La Robla y Toral de los Vados).

Desde el punto de vista social, queda patente que las bajas puntuaciones se deben a la interferencia que estas localizaciones producen en áreas de población muy densas. Aunque es cierto que en el caso de Coslada la interferencia no es directa, sí lo es su relación con las infraestructuras de acceso al municipio

- La peor puntuación en la categoría de accesibilidad es para el puerto seco de Monforte de Lemos. Esto es debido a la escasa calidad de su acceso ferroviario, su falta de acceso directo a carreteras de alta capacidad (la más cercana se sitúa a unos 50 Km) y su baja centralidad a la demanda. Además, comparativamente con el resto de puertos secos, accede a un número bajos de puertos marítimos a menos de 600 Km.
- Para la categoría de localización, la peor puntuación es Venta de Baños. En este caso, el mal resultado se debe a varios efectos: unos inviernos muy duros, con muchos días anuales de heladas; una orografía y una geología complejas que aumentaron los precios de construcción; la presencia en el entorno de un número muy elevado de plataformas logísticas, con las que compite; su pertenencia a un área industrial de tamaño pequeño; y su interferencia con los corredores de transporte ferroviario de viajeros.

7. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

A continuación se recogen las conclusiones obtenidas durante la investigación y se plantean las futuras líneas de investigación que, de desarrollarse, darán continuidad a la investigación realizada en esta Tesis Doctoral.

7.1. Conclusiones

De modo esquemático, se enumeran a continuación las principales conclusiones de esta investigación:

- La evaluación de la calidad de las localizaciones de diversos tipos de instalaciones es un problema geográfico de largo recorrido y pluridisciplinar, con significativas repercusiones económicas, sociales y ambientales. En particular, se ha estudiado la calidad de la localización de puertos secos y se ha profundizado en la evaluación de su sostenibilidad a través de una estructura anidada que comprende 4 categorías, 17 factores y 40 variables. Esta clasificación anidada categorías→factores→variables ha demostrado ser una estructura muy versátil, que permite evaluar la totalidad de la calidad de la localización de los puertos secos pero también aspectos particulares como su sostenibilidad (incluyendo o no en esta última evaluación o su capacidad para optimizar el reparto modal).
- El método DELPHI es una herramienta adecuada para caracterizar la importancia de cada uno de los factores que influyen en la localización de puertos secos y ha demostrado ser una técnica excelente para obtener el consenso en un amplio grupo de expertos con enfoques profesionales y experiencias muy diferentes.

Los factores más importantes para el panel de expertos son: *“Accesibilidad a la red ferroviaria”*, *“Accesibilidad a los puertos marítimos”* y *“Accesibilidad a las principales carreteras de alta capacidad”*. Estos factores forman parte de las consideraciones tradicionales a la hora de establecer cualquier instalación logística. Sin embargo, los resultados del cuestionario DELPHI muestran una preocupación creciente por el desarrollo sostenible en la solución de los problemas, dado que ningún factor obtuvo un peso tan pequeño como para ser despreciado.

No obstante, la aplicación de la herramienta de evaluación pone de manifiesto que esta sensibilidad aún no ha tenido un reflejo en la planificación de la localización de los actuales puertos secos.

Los resultados obtenidos en el DELPHI demuestran también la confianza de los expertos en que los puertos secos ofrecen una oportunidad de potenciar la eficiencia en el uso de los modos de transporte tanto individualmente como en el marco de una integración intermodal para alcanzar una utilización de recursos óptima y sostenible que pasa por un reequilibrio modal que aumente la contribución del ferrocarril en el transporte de mercancías.

- Las Redes Bayesianas permiten aumentar el conocimiento que se tiene de las variables, introduciendo en la herramienta de evaluación no sólo los valores que toman para cada una de las localizaciones sino también unos pesos que dependen de las relaciones que se establecen entre ellas. Además, la triangulación de técnicas permite, por un lado, trabajar con un extenso número de variables y, por otro, reducir la arbitrariedad del modelo de evaluación.

Los resultados del modelo bayesiano, construido para el caso español, muestran que la mayor importancia la tienen 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. En concreto, de las 10 variables más importantes, 6 corresponden a la categoría medioambiental, destacando la variable padre de la Red Bayesiana, *“Distancia a espacios naturales”*.

- La aplicación de la herramienta de evaluación nos permite concluir que tanto la calidad global como la sostenibilidad y el potencial de optimización del reparto modal de las localizaciones de los puertos secos españoles es escasa.

La escasa calidad de las localizaciones de los puertos secos españoles, muy concentrados en algunas Comunidades Autónomas como la Comunidad de Madrid y Castilla y León, parece ser consecuencia de una toma de decisiones políticas sin una metodología de planificación que introdujera en la decisión los criterios técnicos. Esto ha producido un marco de concentración de instalaciones logísticas en competencia directa que debe ser revisado.

Atendiendo a la distribución territorial de los puertos secos en España, a las distancias en que deben situarse respecto los puertos marítimos (unos 600 Km), a la capilaridad que permiten las redes infraestructurales españolas y a la distribución de la población y el PIB en el país (concentrados en el centro peninsular y en las fachadas marítimas), puede concluirse que son necesarios menos puertos secos pero estos deben situarse convenientemente de acuerdo, al menos, a las variables de decisión presentadas en esta investigación. Asimismo, deben emprenderse políticas encaminadas a generar un modelo logístico colaborativo-competitivo en el que se evalúen los diferentes factores (y variables) tenidos en cuenta en esta investigación.

En este sentido, esta Tesis Doctoral supone una primera aproximación al desarrollo de una herramienta de Ayuda a la Toma de Decisiones que permita completar la definición del mapa logístico de España (medida prioritaria nº 15 de la Estrategia logística de España). Se comentan en el siguiente epígrafe los futuros desarrollos en esta línea de investigación.

7.2. Futuras investigaciones

Con el fin de avanzar en la línea de investigación iniciada con esta Tesis Doctoral, se proponen a continuación una serie de trabajos futuros que permitan consolidar la presente propuesta y que pueden ser objeto de futuras Tesis Doctorales:

- Desarrollo de una Herramienta de Ayuda a la Toma de Decisiones basado en el uso de la metodología presentada en esta Tesis Doctoral, con el objetivo de obtener localizaciones óptimas para instalaciones logísticas.

Los Sistemas de Información Geográfica utilizan tradicionalmente técnicas de Análisis Multicriterio para ponderar los distintos atributos de cada mapa, de forma que se puede extraer un mapa que sea combinación lineal de k mapas, cada uno de los cuales está basado en un único atributo del territorio. Así, mediante la superposición de diferentes cartografías (una por cada variable), permitirá conocer la calidad todas las posibles localizaciones del territorio nacional.

Mediante la automatización de las labores de obtención de información geográfica y la integración de un algoritmo de elección multiobjetivo (o bien, directamente, el algoritmo Multicriterio establecido en la Ecuación 14 de este documento), se puede desa-

rollar un método de ayuda a la toma de decisiones que responda a la pregunta “¿Dónde es más adecuado ubicar un nuevo puerto seco?”. Este análisis se puede combinar con los umbrales mínimos o máximos para cada una de las variables, de forma que puedan discriminarse muchas de las localizaciones, al quedar descartadas por tener el valor de alguna de las variables fuera de los umbrales permitidos. De este modo, se obtendría un gran ahorro en términos de coste computacional (haciendo, por tanto, más eficiente el algoritmo de decisión y reduciendo la cantidad de memoria consumida por el mismo).

Así, se superpondrían en transparencias los diferentes mapas, previamente analizados y con el descarte de todas las localizaciones que no serán seleccionadas para ese factor. Cada uno de estos mapas de transparencia superpuestas reflejará los valores de la variable representativa donde estos valores estén dentro de los umbrales permitidos y estará ponderado por el peso correspondiente a su variable y factor asociados. Se obtiene con ellos un nuevo mapa, como combinación lineal ponderada de todos los anteriores que permite realizar un análisis exhaustivo y multidisciplinar para identificar la idoneidad de diferentes localizaciones para acoger un puerto seco de acuerdo al conjunto de variables estudiadas.

Para avanzar en la definición del mapa logístico de España (medida nº 15 de las actuaciones prioritarias de la Estrategia Logística que España), esta Herramienta de Ayuda a la Toma de Decisiones debe ser desarrollada tanto para los puertos secos como para el resto de tipos de plataformas logísticas.

➤ Calibración de los coeficientes β_i y γ_i de la Ecuación 14.

La aplicación de la Ecuación 14 en la futura una Herramienta de Ayuda a la Toma de Decisiones exige la calibración de los coeficientes β_i y γ_i .

Como los coeficientes β_i sirven para tener en cuenta las disposiciones políticas, la disponibilidad de mano de obra y de tecnología, el entorno legislativo, y las posibilidades de crecimiento de la instalación por razones sociales y físicas, futuros trabajos de investigación de otras disciplinas como las ciencias políticas, la sociología o el urbanismo pueden consistir en esta calibración.

Los coeficientes γ_i sirven para filtrar el tipo de plataforma que se evalúa de acuerdo a sus criterios de clasificación. Su inclusión permitirá realizar análisis en paralelo con va-

rios tipos de plataformas logísticas al mismo tiempo o problemas inversos con la una Herramienta de Ayuda a la Toma de Decisiones que respondan a la pregunta *“¿Qué tipo de plataforma logística es más adecuada para una localización determinada?”*.

- Aplicación a la resolución de problemas de geomárketing.

Además, la metodología propuesta es suficientemente versátil como para ser adaptado para 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 geomárketing, el cual es utilizado para problemas como la selección de las mejores ubicaciones de determinadas actividades o negocios, 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 el geomárketing, es posible plantear una alternativa con el uso de nuestra metodología que además incorpore las relaciones que se establecen entre las variables de decisión de cada problema particular.

BIBLIOGRAFÍA

- ADIF. (2013). CIRTRA 2012. Tomo I: Características de Infraestructura. Estructura y equipamiento de los tramos.
- ADIF. (2013). CIRTRA 2012. Tomo II: Circulaciones y Km-Tren por Tramos.
- ADIF. (2013). Declaración sobre la Red 2013.
- Aguilar, J.A. (2005). Subcontratación de servicios logísticos. Logis - Book, Barcelona. Extraído del artículo Operadores y plataformas logísticas de Javier Arturo Orjuela Castro / Óscar Fernando Castro Ocampo / Edwin Andrés Suspes Bulla.
- Aguilera, F., Plata, W., Bosque, J. y Gómez, M. (2009). Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos. Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo. Año 2009, nº 4.
- Aluja, T. (2001). La Minería de Datos, entre la Estadística y la Inteligencia Artificial. Quaderns d'Estadística i Investigació Operativa, vol. 25, n. 3., pp. 479-498.
- Annema, J. A. y Koopmans, C. (2007). Evaluating Transport Infrastructure Investments: The Dutch Experience with a Standardized Approach. Transport Reviews 27(2): 125-150.
- Aparicio, Á. (2010). La toma de decisiones en la política española de transporte: aportación y limitaciones de la evaluación de proyectos. Cuadernos económicos de ICE. - n. 80 (dic. 2010); p. 115-147.
- Astigarraga, E (sin fecha). El método Delphi, Universidad Deusto, San Sebastián. Disponible en: http://www.codesyntax.com/Eneko/Metodo_delphi.doc [Consultado por última vez el 2 de octubre de 2015].
- 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. and Camarero Orive, A. (2015). How should the sustainability of the location of dry ports be measured? A proposed methodology using Bayesian Networks and Multi-Criteria Decision Analysis. Transport, 30(3), 312-319.
- Aydalot, P. (1985). Economie régionale et urbaine. Paris: económica. Milieux innovateurs en Europe. Paris: Gremi.

- Azcárate, M.V. (2007). Repercusiones sociales de una eficaz gestión de los residuos sólidos urbanos: un ensayo en el municipio de El Espinar (Segovia), *Obra Social y Cultural de Caja Segovia*, 2007 - 149 páginas, Universidad Nacional de Educación a Distancia (España).
- Ballis, A. y 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.
- Barba-Romero, S. y Pomerol, J.C. (1997). Decisiones multicriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica. Alcalá de Henares, Servicio de publicaciones, Universidad de Alcalá. 420 p.
- Barredo, J.I. y Bosque, J. (1999). Multicriteria evaluation methods for ordinal data in a GIS environment. *Geographical Systems*, nº 5, pp. 313-327
- Basel Committee on Banking Supervision. (2001). Sound Practices for the Management and Supervision of Operational Risk.
- Basogain, X. (2008). Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones. Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao, EHU. Departamento de ingeniería de sistemas y automática.
- Bergqvist, R., Macharis, C., Meers, D., y Woxenius, J. (2015). Making hinterland transport more sustainable a multi actor multi criteria analysis. *Research in Transportation Business & Management*, 14, 80-89.
- 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.
- Bockhorst, J., Craven, M., Page, D., Shavlik, J., & Glasner, J. (2003). A Bayesian network approach to operon prediction. *Bioinformatics*, 19(10), 1227-1235.
- Bolstad, P. (2005). GIS Fundamentals: A first text on Geographic Information Systems, Second Edition. White Bear Lake, MN: Eider Press, 543 pp.
- Bosque, J. (1997). Sistemas de información geográfica. Madrid, Ediciones. Rialp, 2ª edición corregida, 451 pp.
- Bosque, J. y García, R. (2000). El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial. *Anales de Geografía de la Universidad complutense*, nº 20, pp. 49-67.
- Bosque, J. y Gómez, M.; Moreno A.; Dal Pozzo, F. (2001). Hacia un sistema de ayuda a la decisión espacial para la localización de equipamientos. *Estudios geográficos*, tomo LXI, nº 241, pp. 567-598.
- Bosque, J., Díaz, C. y Díaz, M.A. (2002). De la justicia espacial a la justicia ambiental en la política de localización de instalaciones para la gestión de residuos en la comunidad de Madrid. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, t. CXXXVII-CXXXVIII, 2001-2002, pp. 89-114.

- Bosque, J., Delgado, M., Rodríguez, V., Díaz, M.A., Rodríguez, A.E. y Vela, A. (1999). Localización de centros de tratamiento de residuos. Una propuesta metodológica basada en un SIG. *Anales de Geografía de la UCM*, nº 19, 1999, pp. 295-323.
- Bosque, J., Gómez, M. y Palm, F. (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.
- Bourgoin, J. y Castella, J.C. (2011). "PLUP FICTION": Landscape Simulation for Participatory Land Use Planning in Northern Lao PDR. *Mountain Research and Development*, 31(2):78-88. 2011.
- Brown, N.D. (2005). La teoría de la localización. Documento de trabajo, Universidad de Barcelona.
- Bueno, P.C., Vassallo, J.M., Cheung, K. (2014). Helping decision-makers select the most adequate road infrastructure design from the point of view of sustainability: a practical approach, XVIII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística (PANAM 2014), Junio de 2014, Santander, España.
- 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. y González, N. (2005). Cadenas integradas de transporte. Fundación Agustín de Betancourt. Ministerio de Fomento.
- Camarero, A. y González, N. (2007). Logística y transporte de contenedores. Fundación Agustín de Betancourt. Ministerio de Fomento.
- Cardozo, E.F. y Arguello, H. (2011). Aprendizaje estructural de Redes Bayesianas: un enfoque basado en puntaje y búsqueda. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 21(1), 29-50.
- Castellanos, A. (2004). Manual de la gestión logística del transporte y distribución de mercancías. Ediciones Uninorte. Página 2.
- Castillo, E. (1997). Expert systems and probabilistic network models. Springer Science & Business Media.
- Celikoglu, H.B. y Cigizoglu, H.K. (2007a). Modelling public transport trips by radial basis function neural networks. *Mathematical and Computer Modelling*, pp. 480-489.
- Celikoglu, H.B. y Cigizoglu, H.K. (2007b). Public transportation trip flow modeling with generalized regression neural networks. *Advances in Engineering Software*, 38(2), 71-79.
- Chang, K. (2006). Introduction to Geographic Information Systems, Boston: McGraw Hill Higher Education, Third Edition.

- Chow, C.K., y Liu, C.N. (1968). Approximating discrete probability distributions with dependence trees. *Information Theory, IEEE Transactions*, 14(3), 462-467.
- Christaller, W. (1933). *Central Places in Southern Germany*, Prentice Hall, Englewood Cliffs. N.J.
- Clarke, K. C. (1999). *Getting Started With Geographic Information Systems*, Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Comisión Europea (2000). IQ - Intermodal Quality. Final Report, Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme - Integrated Transport Chain.
- Comisión Europea (2001). White Paper: European Transport Policy for 2010: Time to decide. Office for official publications of the European Communities, Luxemburg.
- Comisión Europea (2010). Expert group 1: methodology for TEN-T planning (2010). Proposal on TEN-T Network Planning.
- Comisión Europea. (2011). White Paper: Roadmap to a single European transport area towards a competitive and resource efficient transport system.
- Conesa, C. (1996). Áreas de aplicación medioambiental de los SIG. Modelización y avances recientes. *Papeles de Geografía*, n. 23-24, 1996. PAGES. 101-115. Universidad de Murcia.
- Cooper, G. y Herskovits, E. (1992). A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data. *Machine Learning* 9, 309-348.
- Costa, Á. y Markellos, R. N. (1997). Evaluating public transport efficiency with neural network models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 5(5), 301-312.
- Costa, M.T., Segarra, A. y Viladecans, E. (2000). Pautas de localización de las nuevas empresas y flexibilidad territorial, III Encuentro de economía Aplicada. Valencia, España.
- Cowen, D.J. (1990). GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences? In Peuquet, D.J. and Marble, D.F. (eds.) *Introductory Readings in Geographic Information Systems*, New York: Taylor & Francis, pp 52-61.
- De Mers M. (2008). *Fundamentals of Geographic Information Systems* (4th edition). New York: John Wiley and Sons, Inc.
- De Mers, M.N. (2002). *GIS Modeling in Raster*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Dorado, G., García, M.J. y Nicolás, J.M. (2009). *Fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica*. OCW, Universidad Politécnica de Madrid (España).

- Dougherty, M. (1995). A review of neural networks applied to transport, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 3(4), pp. 247-260.
- Elvira Consortium (2002). Elvira: An environment for probabilistic graphical models. In J. Gámez and A. Salmerón (Eds.), *Proceedings of the First European Workshop on Probabilistic Graphical Models (PGM'02)*, pp. 222–230.
- Er, M. C. (1988). Decision support systems: a summary, problems, and future trends. *Decision Support Systems*, 4(3), 355-363.
- Estrada, J.L. (2011). Puertos secos y generación de valor para las cargas del comercio internacional, XX congreso latinoamericano de puertos, Lima, Perú.
- Fan, L.; Mumford, C.L., Evans, D. (2010), A Simple Multi-Objective Optimization Algorithm for the Urban Transit Routing Problem, School of Computer Science, Cardiff University, UK.
- Felgaer, P. (2004). Optimización de Redes Bayesianas basado en técnicas de aprendizaje por inducción. Buenos Aires, Argentina: Tesis de grado en Ingeniería Informática, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.
- Fernández, E. (2004). Análisis de Clasificadores Bayesianos. Trabajo Final de Especialidad en Ingeniería de Sistemas Expertos. Escuela de Postgrado. Instituto Tecnológico de Buenos Aires
- Forester, J. (2008) Editorial, *Planning Theory & Practice*, 9(3): 299-304.
- Freeman, C., Clark, R.D. y Van Heezik, Y (2011). Creating Ecologically Based Land Use and Habitat Maps Quickly and Cheaply to Support Conservation Planning at Local Scales: A New Zealand Example. *Geographical Research* Volume 49, Issue 1, pages 99–111.
- García-Aguado, A.M. (2003). Programación estocástica por metas: teoría y aplicaciones económicas. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.
- Gómez A.J. (1998). Inteligencia Artificial, Aprendizaje y Minería de Datos. Grupo de Sistemas Inteligentes, Universidad Politécnica de Madrid.
- González, N. (2007). Metodología para la determinación de parámetros de diseño de terminales portuarias de contenedores a partir de datos de tráfico marítimo, Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- González, N. y Camarero, A. (2012a). Optimización de procesos en terminales portuarias por técnicas de simulación. SEIO 2012. XXXIII Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa y de las VII Jornadas de Estadística Pública, Madrid (España).

González, N. y Camarero, A. (2012b). Estimación de parámetros de instalaciones portuarias mediante Redes Bayesianas. SEIO 2012. XXXIII Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa y de las VII Jornadas de Estadística Pública, Madrid (España).

González, N., Camarero, A., Soler, F. y Camarero, A. (2012). Use of Bayesian Networks as method for the characterization of physical parameters of the terminals of containers of the Spanish port system, PANAM 2012 XVII versión del Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística, Universidad de los Andes en Santiago de Chile (Chile).

Greenhut, M. L. (1956). *Plant Location in Theory and Practice*, New York, 338pp.

Greenwald, B., Stiglitz, J.E. (1986). "Externalities in economies with imperfect information and incomplete markets". *Quarterly Journal of Economics* 101 (2): 229–264.

Gutiérrez, J. y Gould, M. (1994). *SIG: Sistemas de Información Geográfica*, Editorial Síntesis, Madrid, 251 pp.

Hall, P. V., McCalla, R. J., Comtois, C., & Slack, B. (2011). *Integrating seaports and trade corridors*. Ashgate Publishing, Ltd.

Hanappe, P. (1986). Plantes-formes logistique, centres de logistique, portssecsy. *Recherche Transports Sécurité*, INRETS, Arceuil, Decembre, 21–26.

Hernández Orallo, J., Ramírez Quintana, M. J., & Ferri Ramírez, C. (2004). *Introducción a la Minería de Datos*. Editorial Pearson Educación SA, Madrid.

Herskovits, E.H. (1991). *Computer-based probabilistic network construction*. Doctoral dissertation, Medical Information Sciences, Stanford University, Stanford, CA.

Hesse, M. y Rodrigue, J.P. (2004). The transport geography of logistics and freight distribution, *Journal of Transport Geography*, 12(3), pp. 171-184.

Hesse, M. y 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.

Hwang, C. L., Masud, A. S. M., Paidy, S. R., & Yoon, K. P. (1979). *Multiple objective decision making, methods and applications: a state-of-the-art survey*(Vol. 164). Berlin: Springer.

- Ignizio, J.P., Cavalier, T.M. (1994). *Linear Programming*. Prentice-Hall, Engelwood Cliffs, New Jersey.
- 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.
- Janssens, D., Wets, G., Brijs, T., Vanhoof, K., Arentze, T. y Timmermans, H. (2004). Improving performance of multiagent rule-based model for activity pattern decisions with Bayesian networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1894(1), 75-83.
- Janssens, D., Wets, G., Brijs, T., Vanhoof, K., Arentze, T. y Timmermans, H. (2006). Integrating Bayesian networks and decision trees in a sequential rule-based transportation model. *European Journal of operational research*, 175(1), 16-34.
- Jaržemskis, A. y Vasiliauskas, A.V. (2007). Research on dry port concept as intermodal node, *Transport*, 22(3), pp. 207-213. Transport Research Institute, Vilnius Gediminas Technical University.
- Ka, B. (2011). Application of Fuzzy AHP and ELECTRE to China Dry Port Location Selection. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 27(2), 331-353.
- Karlaftis, M.G. y Vlahogianni, E.I. (2011). Statistical methods versus neural networks in transportation research: Differences, similarities and some insights. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(3), 387-399.
- 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.
- Landeta, J. (1997). Las técnicas de grupo; instrumento de mejora en las estimaciones y decisiones empresariales. *ESIC Market*. Marzo.
- Landeta, J. (1999). *El método Delphi. Una técnica de previsión para la incertidumbre*. Ed. Ariel. Barcelona.
- Larrañaga, P., Poza, M., Yurramendi, Y., Murga, R. H., & Kuijpers, C. M. H. (1996). Structure learning of Bayesian networks by genetic algorithms: A performance analysis of control parameters. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 18(9), 912-926.
- Latorre, M. (2012). Localización optima de bases de bicicletas públicas en Madrid mediante los Sistemas de Información Geográfica, Trabajo de Fin de Máster, Máster en Tecnologías de la Información Geográfica, Universidad Complutense de Madrid (España).

- Ledoux, C. (1997). An urban traffic flow model integrating neural networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 5(5), 287-300.
- Lévêque, P. y Roso, V. (2002). Dry Port concept for seaport inland access with intermodal solutions. Master Thesis. Department of Logistics and Transportation, Chalmers University of Technology.
- Linstone, H. A. y Turoff, M. (1975). *The Delphi method: Techniques and applications*. Addison-Wesley Publishing Company, Advanced Book Program.
- Litman, T. (2007). Developing indicators for comprehensive and sustainable transport planning. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2017(-1), 10-15.
- Lizano (2008). *Apuntes sobre teorías de la localización del curso de geografía económica*. Universidad de Costa Rica. Escuela de Geografía Económica.
- Lösch, A. (1940). *The Economics of Location*. Traducción al inglés :New Haven, Conn: Yale University Press, 1954.
- Mac Carthy, B. L. y Atthirawong, W. (2003). Factors affecting location decisions in international operations—a Delphi study. *International Journal of Operations & Production Management*, 23(7), 794-818.
- Macharis, C., Melo, S., Woxenius, J., y van Lier, T. (2014). *Sustainable Logistics (Vol. 6)*. Emerald Group Publishing.
- Malczewski, J. (2004). GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in planning*, 62(1), 3-65.
- Mauttone, A.; Urquhart, M. (2005), *Optimización multiobjetivo de recorridos y frecuencias en el transporte público urbano colectivo*, Tesis Doctoral, Departamento de Investigación Operativa, Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de La República, Uruguay.
- 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.
- Mc Kinnon, A. y Forester, M. (2000). Full Report of the Delphi 2005 Survey: European Logistical and Supply Chain Trends: 1999–2005. Report for TRILOG–Europe.
- McHarg, I. L., & Mumford, L. (1969). Design with nature (pp. 7-17). New York: American Museum of Natural History.
- Michalski, R.S. (1983). *A theory and methodology of inductive learning*. Springer Berlin Heidelberg.

Ministerio de Fomento (2011). Informe del 3 de junio de 2011 del Observatorio del transporte intermodal terrestre y marítimo. Ministerio de Fomento, Gobierno de España.

Ministerio de Fomento. (2013a). Estrategia logística de España. Ministerio de Fomento, Gobierno de España.

Ministerio de Fomento. (2013b). Mapa de carreteras del Estado y red de gran capacidad a 31 de diciembre de 2012.

Ministerio de Fomento. (2015). Evolución de los indicadores económicos y sociales del transporte terrestre, Observatorio del transporte y la logística de España. Ministerio de Fomento, Gobierno de España.

Monios, J. (2011). The role of inland terminal development in the hinterland access strategies of Spanish ports. Transport Research Institute, Edinburgh Napier University, Merchiston Campus, Edinburgh, United Kingdom.

Moreno, A. (1999). En busca de la localización óptima para instalaciones perjudiciales: propuesta de modelos y resolución con sistemas de información geográfica. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, ISSN 0212-9426, Nº. 27, 1999, pags. 81-98.

Moreno, A., Gómez, N., Vidal, M. J., Rodríguez, J. A., Martínez, P., Prieto, M. E., Cervera, B. y Fernández, F. (2008). Sistemas y análisis de la información geográfica: manual de auto-aprendizaje con ArcGIS, Madrid, Ra-Ma, 2ª ed., 940 pp.

Moscoso, J.A., Ruiz J.J., Cerbán M.M., Turias I.J. y Duarte A.L. (2011). Técnicas de predicción en el tráfico Ro-Ro en el nodo logístico del Estrecho de Gibraltar. IAME 2011.

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.

Murat, Y.S. y Ceylan, H. (2006). Use of artificial neural networks for transport energy demand modeling, Energy Policy, 34(17), pp. 3165-3172.

NCGIA (1990). National Centre of Geographic Information and Analysis Report.

Newman, A.M. y Yano, C.A. (2000). Scheduling direct and indirect trains and containers in an intermodal setting, Transportation science, 34(3), pp. 256-270.

Nilsson, D. (1998). An efficient algorithm for finding the most probable configurations in probabilistic expert systems. Statistics and Computing 8, 159–173.

- Notteboom, T.E. (2002). Consolidation and contestability in the European container handling industry, *Maritime Policy & Management* , 29(3), pp. 257-269.
- Notteboom, T.E. y Rodrigue, J.P. (2008). Containerisation, box logistics and global supply chains: The integration of ports and liner shipping networks. *Maritime Economics & Logistics*, 10(1), 152-174.
- Paliwal, M. y Kumar, U.A. (2009). Neural networks and statistical techniques: A review of applications, *Expert Systems with Applications*, 36(1), pp. 2-17.
- Parola, F. y Sciomachen, A. (2005). Intermodal container flows in a port system network: Analysis of possible growths via simulation models, *International Journal of Production Economics*, 97(1), pp. 75-88.
- Pearl, J. (1988). Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference. Morgan Kaufmann.
- Peng, Z. H. y Luan, X. (2011). Application Research on Traffic Modal Choice Based on Decision Tree Algorithm. *Applied Mechanics and Materials*, 97, 843-848.
- Plata, W., Gómez, M. y Bosque, J. (2010). Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid. *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157.
- Pons, A. (2008). Localizaciones óptimas para puertos secos. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio.
- Puertos del Estado. (2015). Mapa de puertos marítimos.
- Puga, J., García, J., de la Fuente, M.L. (2006). Modelado causal con Redes Bayesianas. XXVII Jornadas de Automática Almería - ISBN: 84-689-9417-0 199.
- Quijada-Alarcón, J., González, N., Camarero, A. y Soler, F. (2012). Road network analysis using decision trees algorithm: A case of study of Panama. The 1st Virtual International Conference on Advanced Research in Scientific Areas (ARSA-2012), University of Zilina, Slovakia.
- Reilly, W.J. (1931). The Law of Retail Gravitation. Texas University (USA).
- Richardson, A. J., Ampt, E. S. y Meyburg, A. H. (1995). Survey methods for transport planning . Oakland, CA: Eucalyptus Press.
- Roche, F. (2002). Metodos para obtener conocimiento utilizando Redes Bayesianas y procesos de aprendizaje con Algoritmos Evolutivos. Memoria de Investigación, Univerddidad de Sevilla, España.
- Rodrigue, J.P. (1999). Globalization and the synchronization of transport terminals, *Journal of Transport Geography*, 7(4), pp. 255-261.

- 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., Comtois, C. y Slack, B. (2009). *The geography of transport systems*. Second Edition, New York: Routledge, 352 pages. ISBN 978-0-415-48324-7.
- Romero, C. (1996). *Análisis de las decisiones multicriterio*. Madrid: Isdefe.
- Roso, V. (2007). Evaluation of the dry port concept from an environmental perspective: A note, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(7), pp. 523-527.
- Roso, V. (2008). Factors influencing implementation of a dry port, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(10), pp. 782-798.
- Roso, V., Brnjac, N., y Abramovic, B. (2015). Intermodal Terminal Location—Criteria Evaluation. In *Transportation Research Board 94th Annual Meeting* (No. 15-0509).
- Roso, V., Woxenius, J. y Lumsden, K. (2009). The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland, *Journal of Transport Geography*, 17(5), pp. 338-345.
- Rowe, G. y Wright, G. (2001). Expert opinions in forecasting: The role of the Delphi technique. *International Series in Operations Research and Management Science*, 125-144.
- Rutten, B.J.C.M. (1998). The design of a terminal network for intermodal transport, *Transport Logistics*, 1(4), pp. 279-298.
- Sampedro, J.L. (1957.) *Principios de localización industrial*. Editorial Aguilar. 330 páginas.
- Sastre, P. (2010). *Sistemas de Información Geográfica (SIG): Técnicas básicas para estudios de biodiversidad*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España.
- SIANI (2011). *Memoria resumen de los trabajos realizados*, Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- 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
- Soria, J.A., Valenzuela L.M. y Aguilera, F. (2009). The incidence of planning in the growth and change of the Metropolitan Area of Granada. *City Futures '09. City Futures in a Globalising World*. An international conference on globalism and urban change. EURA: European Urban Research Association and UAA: Urban Affairs Association. Paper. Madrid (Spain).

- Sucar, L. (1992). Probabilistic reasoning in knowledge based vision systems. PhD dissertation, Imperial College of Science, Technology, and Medicine, London U.K.
- Trip, J.J. y Bontekoning, Y. (2002). Integration of small freight flows in the intermodal transport system, *Journal of Transport Geography* , 10(3), pp. 221-229.
- UN ECE (1998). UN/LOCODE Code for Ports and other Locations. Recommendation 16. Geneva.
- Universidad de Cádiz (2013). Curso (On line) SIG y Medio Ambiente: Principios Básicos. Capítulo Primero: Los Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- 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.
- van Klink, H.A. (2000). Optimisation of land access to sea ports. In *Proceedings of the land access to sea ports*, European Conference of Ministers of Transport, pp. 10-11.
- Vassallo, J.M., Awad, S., de las Heras, J. (2014). Balance Económico: Fiscal, Social y Medio Ambiental del Sector del Transporte de Mercancías en España. In Press: Fundación Francisco Corell.
- Von Thünen (1826). *Der isolirte Staat in Beziehung auf Landwirthschaft und Nationalökonomie*.
- 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).
- Woxenius, J. (1998). Development of small-scale intermodal freight transportation in a systems context. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Zellner, A. (1987). *Introducción a la inferencia bayesiana en Econometría*. John Wiley & Sons.
- Zemp, S., Stauffacher, M., Lang, D.J. y Scholz, R.W. (2011). Classifying railway stations for strategic transport and land use planning: Context matters! *Journal of Transport Geography*, Volume 19, Issue 4, pp. 670-679.

ANEXO 1. GLOSARIO DE TÉRMINOS RELACIONADOS CON LAS REDES BAYESIANAS

Arco. Es un par ordenado (X, Y) . Esta definición de arco corresponde a lo que en otros lugares se denomina arco dirigido. En la representación gráfica, un arco (X, Y) viene dado por una flecha desde X hasta Y .

Grafo dirigido. Es un par $G = (N, A)$ donde N es un conjunto de nodos y A un conjunto de arcos definidos sobre los nodos.

Grafo no dirigido. Es un par $G = (N, A)$ donde N es un conjunto de nodos y A un conjunto de arcos no orientados (es decir, pares no ordenados (X, Y)) definidos sobre los nodos.

Camino. Es una secuencia ordenada de nodos $X_i = (1, \dots, X_i, r)$ tal que $\forall j = 1, \dots, r - 1$, ó bien el arco $X_j \rightarrow X_{j+1} \in A$ ó bien el arco $X_{j+1} \rightarrow X_j \in A$.

Camino dirigido. Es una secuencia ordenada de nodos $X_i = (1, \dots, X_i, r)$ tal que $\forall j = 1, \dots, r - 1$ el arco $X_j \rightarrow X_{j+1} \in A$.

Ciclo: es un camino no dirigido que empieza y termina en el mismo nodo X .

Grafo acíclico: es un grafo que no contiene ciclos.

Padre. X es un padre de Y si y sólo si existe un arco $X \rightarrow Y$. Se dice también que Y es hijo de X . Al conjunto de los padres de X se representa como $pa(X)$, y al de los hijos de X por $S(X)$.

Antepasado o ascendiente. X es un antepasado o ascendiente de Z si y sólo si existe un camino dirigido de X a Z .

Conjunto ancestral de un nodo X es un conjunto que contiene a X y a todos sus antepasados.

Descendiente. Z es un descendiente de X si y sólo si X es un antepasado de Z . Al conjunto de los descendientes de X lo denotaremos por $de(X)$.

Variable proposicional es una variable aleatoria que toma un conjunto exhaustivo y excluyente de valores. La denotaremos con letras mayúsculas, por ejemplo X , y a un valor cualquiera de la variable con la misma letra en minúscula, x .

Dos variables X e Y son independientes si se tiene que $P(X/Y) = P(X)$. De esta definición se tiene una caracterización de la independencia que se puede utilizar como definición alternativa: X e Y son independientes si y sólo si $P(X, Y) = P(X) \cdot P(Y)$.

Dos variables X e Y son independientes dado una tercera variable Z si se tiene que $P(X/Y, Z) = P(X/Y)$. De esta definición se tiene una caracterización de la independencia que se puede utilizar como definición alternativa: X e Y son independientes dado Z si y sólo si $P(X, Y/Z) = P(X/Z) \cdot P(Y/Z)$. También se dice que Z separa condicionalmente a X e Y .

ANEXO 2. CUESTIONARIO DELPHI (PRIMER LANZAMIENTO)

Persona de contacto: Samir Awad Núñez

Dirección de contacto: E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos,

Avd. Profesor Aranguren s/n,

28040, Madrid (España)

Email de contacto: samir.awad@caminos.upm.es

Teléfono de Contacto: 618620079

1. PRESENTACIÓN

En primer lugar queremos agradecerle su participación en este estudio. Sus opiniones como experto serán de suma utilidad para la realización de mi Tesis Doctoral, dirigida por los profesores Alberto Camarero Orive y Nicoletta González Cancelas del Departamento de Ingeniería Civil - Transportes de la Universidad Politécnica de Madrid.

El objetivo principal de esta investigación es la propuesta de un modelo que permita la evaluación de la calidad de las localizaciones de los puertos secos existentes actualmente en España y, como paso intermedio, se plantea la realización de un cuestionario DELPHI, en el cual me gustaría contar con su colaboración. Por supuesto, su participación será anónima hacia terceros, y las estimaciones y opiniones que usted vierta en el cuestionario serán absolutamente confidenciales.

El método DELPHI es un procedimiento de evaluación en el que participan un panel de expertos que expresan su opinión en un determinado tema. Este método se utiliza desde hace varias décadas en estudios similares a éste. Para los efectos del panel, el método consta fundamentalmente de dos fases:

- 1ª Fase: un grupo de expertos seleccionados realiza individualmente una serie de estimaciones y expresa sus opiniones.
- 2ª Fase: los resultados “*promedio*” de la 1ª fase son remitidos otra vez a cada uno de los expertos, con objeto de que reconsideren sus propuestas individuales (modificándolas o no) en función de la información global recibida procedente del panel de expertos, con objeto de reducir las desviaciones que se producen en cada repuesta.

Por ello, además de este primer cuestionario, recibirán otro cuestionario con los promedios de la 1ª fase, para que reconsidere, si así lo considera oportuno, sus respuestas.

No olvide que ante cualquier duda o dificultad puede ponerse en contacto con el responsable del estudio, que gustosamente le ayudará. Y no dude en anotar sus observaciones, si las considera necesarias, en el espacio habilitado para ello.

2. LOS FACTORES

Con una exhaustiva revisión bibliográfica, se determinaron los factores que influyen en la localización de actividades. Tras particularizar estos factores al tipo de instalación que es un puerto seco y para adaptar el conjunto de factores al alcance que debe tener la Tesis Doctoral, se tendrán en cuenta los siguientes factores:

NOMBRE DEL FACTOR	OBSERVACIONES
Impacto sobre el medio natural	
Impacto sobre el medio urbano	
Afección hidrológica	Impacto sobre cursos de agua superficial y subterránea
Precio del suelo	
Crecimiento potencial de la demanda	Posible aumento de la demanda por una mayor penetración en el mercado al introducir una instalación logística en el interior del territorio
Rango del municipio de acogida	Se define como el ratio entre los beneficios por el acceso a una gran población y los perjuicios que se producen sobre ella como externalidades de la actividad que se desarrolla en los puertos secos
Accesibilidad a la red ferroviaria	
Accesibilidad a las principales carreteras de alta capacidad	
Accesibilidad a aeropuertos	Además de tener en cuenta la posibilidad de acceder a estas redes, estos factores incluyen la calidad de ese acceso
Accesibilidad a puertos marítimos	
Accesibilidad a la dotación de suministros y servicios	
Clima	
Orografía	
Geología	
Relación con otras plataformas logísticas	
Integración en los principales corredores	
Optimización potencial del reparto modal	Posible reequilibrio del reparto modal por una reordenación del mercado de transporte al introducir una instalación logística en un emplazamiento que combina la accesibilidad a la red ferroviaria y a la red de carreteras

3. EL CUESTIONARIO

Esta primera ronda del DELPHI consiste en rellenar el pequeño estadillo que está pensado para que contestarlo no lleve más de 10 minutos.

En la primera columna aparece la lista de factores anteriormente presentada.

En la segunda columna (Peso 1ª ronda) deben otorgar un peso a cada uno de los factores en función de la importancia que ustedes consideren que tienen para evaluar la calidad de las localizaciones de los puertos secos existentes actualmente en España. Estos pesos pueden oscilar entre 1 y 10, siendo 1 “*nada importante*” y 10 “*imprescindible*”. Es importante que respondan con número naturales.

En la tercera columna (Orden de importancia) deben ordenar de 1º a 17º los factores, de forma que 1º sea el factor que consideran más importante, 2º el segundo factor que consideran más importante y así sucesivamente hasta el 17º factor. Esta tercera columna permitirá realizar la clasificación en el caso de que en la segunda columna haya varios factores con el mismo peso de ponderación.

NOMBRE DEL FACTOR	ORDEN DE IMPORTANCIA	PESO 1ª RONDA
Impacto sobre el medio natural		
Impacto sobre el medio urbano		
Afección hidrológica		
Precio del suelo		
Crecimiento potencial de la demanda		
Rango del municipio de acogida		
Accesibilidad a la red ferroviaria		
Accesibilidad a las principales carreteras de alta capacidad		
Accesibilidad a aeropuertos		
Accesibilidad a puertos marítimos		
Accesibilidad a la dotación de suministros y servicios		
Clima		
Orografía		
Geología		
Relación con otras plataformas logísticas		
Integración en los principales corredores		
Optimización potencial del reparto modal		

4. COMENTARIOS

Anote por favor aquello que considere oportuno respecto a las preguntas o contenidos del cuestionario y del estudio en general.

5. DESPEDIDA Y AGRADECIMIENTO

Les ruego que contesten esta primera fase con la mayor prontitud posible para poder avanzar en las siguientes tareas. Les recuerdo que cuando finalice el análisis de los resultados que me envíen en esta primera fase, les enviaré un segundo cuestionario del mismo formato y también muy rápido de rellenar.

Les agradezco de antemano su tiempo y atención. Quedo a su disposición para cualquier consulta que quieran realizar.

ANEXO 3. CUESTIONARIO DELPHI (SEGUNDO LANZAMIENTO)

Persona de contacto: Samir Awad Núñez

Dirección de contacto: E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos,

Avd. Profesor Aranguren s/n,

28040, Madrid (España)

Email de contacto: samir.awad@caminos.upm.es

Teléfono de Contacto: 618620079

1. PRESENTACIÓN

Finalizado el análisis de los resultados de la primera fase, procedo a enviarles el segundo cuestionario.

Antes que nada quiero agradecerles una vez más que se tomaran la molestia de ayudarme en mi investigación contestando el cuestionario que les envié hace algunos días.

En esta segunda ronda es necesario que revisen los pesos que aportaron en la primera ronda atendiendo a las diferencias que existen entre sus respuestas y las del resto de expertos. Para ello deben rellenar el pequeño estadillo que encontrarán al final de este documento (está pensado para que contestarlo no lleve más de 5 minutos).

2. RESULTADOS DE LA PRIMERA FASE

Se resumen a continuación los resultados de la primera ronda, los cuales sirven de apoyo a la realización del cuestionario:

➤ Media aritmética

La media aritmética (también llamada promedio) es el valor característico de una serie de datos cuantitativos objeto de estudio que parte del principio de la esperanza matemática o valor esperado. Se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos: $\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$.

➤ Mediana

La mediana representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados

Sean $x_1, x_2, \dots, x_n$ los datos de una muestra *ordenada en orden creciente* y designando la mediana como Me , distinguimos dos casos:

a) Si n es impar, la mediana es el valor que ocupa la posición $\frac{n+1}{2}$ una vez que los datos han sido ordenados (en orden creciente o decreciente), porque éste es el valor central. Es decir: $Me = x_{\frac{n+1}{2}}$.

b) Si n es par, la mediana es la media aritmética de los dos valores centrales. Es decir: $Me = \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}}{2}$.

➤ Diagramas de cajas y bigotes

Un “*diagrama de cajas y bigotes*” (también “*box and whiskers*” o *boxplot*) es un gráfico, basado en cuartiles, mediante el cual se visualiza un conjunto de datos. Está compuesto por un rectángulo, la “*caja*”, y dos brazos, los “*bigotes*”, tal como se expone en el siguiente esquema:

Este gráfico suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q1, Q2 (que coincide con la mediana) y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución.

A continuación se muestran los diagramas de cajas y bigotes de los resultados de la primera ronda del cuestionario. En ellos, los factores aparecen codificados con los siguientes códigos:

NOMBRE DEL FACTOR	CÓDIGO DE FACTOR
Impacto sobre el medio natural	imp_nat
Impacto sobre el medio urbano	imp_urb
Afección hidrológica	hydro
Precio del suelo	land_pri
Crecimiento potencial de la demanda	dem_gro
Rango del municipio de acogida	mun_ran
Accesibilidad a la red ferroviaria	acc_rail
Accesibilidad a las principales carreteras de alta capacidad	acc_road
Accesibilidad a aeropuertos	acc_air
Accesibilidad a puertos marítimos	acc_port
Accesibilidad a la dotación de suministros y servicios	acc_sup
Clima	wea
Orografía	orog
Geología	geol
Relación con otras plataformas logísticas	rel_plat
Integración en los principales corredores	sup_cha
Optimización potencial del reparto modal	mod_shi

3. EL CUESTIONARIO

En la primera columna aparece la lista de factores anteriormente presentada.

En la segunda columna (Peso 1ª ronda) encontrarán los pesos que otorgaron a cada factor en la primera ronda.

Las columnas tercera y cuarta recogen dos medidas de tendencia central, la media aritmética y la mediana. Se han utilizado simultáneamente la media aritmética y la mediana para aprovechar las potencialidades de cada una. El motivo es que la media aritmética es una medida muy intuitiva, 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 ha optado por el uso de la mediana.

En la cuarta columna deben otorgar un peso a cada uno de los factores en función de la importancia que ustedes consideren que tienen para evaluar la calidad de las localizaciones de los puertos secos existentes actualmente en España. Al igual que en la primera ronda, estos pesos pueden oscilar entre 1 y 10, siendo 1 *“nada importante”* y 10 *“imprescindible”*. Es importante que respondan con número naturales. El peso que decidan aportar puede ser el mismo que propusieron en la primera ronda o diferente si consideran que su opinión puede variar a la vista de los resultados que se adjuntan en el anexo al cuestionario.

Por último, igual que en la primera ronda, hay un recuadro de observaciones para realizar cualquier comentario que se considere de interés.

NOMBRE DEL FACTOR	PESO QUE APORTÓ USTED EN LA 1ª RONDA	MEDIA ARITMÉTICA	MEDIANA	PESO 2ª RONDA
Impacto sobre el medio natural	XXXX*	6.44	7	
Impacto sobre el medio urbano	XXXX*	6.61	7	
Afección hidrológica	XXXX*	5.69	6	
Precio del suelo	XXXX*	6.81	7	
Crecimiento potencial de la demanda	XXXX*	7.61	8	
Rango del municipio de acogida	XXXX*	4.88	5	
Accesibilidad a la red ferroviaria	XXXX*	8.88	10	
Accesibilidad a las principales carreteras de alta capacidad	XXXX*	8.46	9	
Accesibilidad a aeropuertos	XXXX*	5.58	5	
Accesibilidad a puertos marítimos	XXXX*	9.05	10	
Accesibilidad a la dotación de suministros y servicios	XXXX*	6.97	7	
Clima	XXXX*	3.19	3	
Orografía	XXXX*	5.10	5	
Geología	XXXX*	3.85	3	
Relación con otras plataformas logísticas	XXXX*	7.58	8	
Integración en los principales corredores	XXXX*	8.02	8	
Optimización potencial del reparto modal	XXXX*	7.08	7	

XXXX* Cada experto lleva en esta columna sus propias respuestas de la primera ronda

4. COMENTARIOS

Anote por favor aquello que considere oportuno respecto a las preguntas o contenidos del cuestionario y del estudio en general.

5. DESPEDIDA Y AGRADECIMIENTO

Les ruego que contesten con la mayor prontitud posible esta segunda fase, con objeto de avanzar con celeridad y proseguir con las siguientes fases de la Tesis Doctoral. Cuando estén los resultados de la segunda fase se los enviaré por si fueran de su interés. Asimismo, cuando defienda la Tesis Doctoral, les enviaré el documento completo para que puedan conocer el resultado de la investigación en la cual han participado.

Les agradezco de antemano su tiempo y atención. Quedo a su disposición para cualquier consulta que quieran realizar.

ANEXO 4. STANDARDISED CRITERIA ASSESSMENT SCORE CODIFICADOS

Category	Dry Port											
	Variable	Type	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
imp_nat	DNS	Profit	1.65	1.00	2.50	11.00	6.40	2.30	2.50	0.90	4.40	7.00
	CNE	Profit	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	NIS	Cost	10.00	2.00	3.00	4.00	4.00	2.00	3.00	3.00	12.00	14.00
	DFA	Profit	10.00	10.00	0.00	0.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
imp_urb	DUS	Profit	0.25	0.00	0.00	0.20	0.20	0.00	0.35	0.61	0.20	0.00
	CUE	Cost	1.00	6.00	2.00	1.00	0.50	4.00	2.00	1.00	3.00	4.00
hydro	DSW	Profit	0.38	1.00	0.79	0.00	0.00	2.30	2.35	0.90	4.57	0.00
	FL	Profit	10.00	0.00	5.00	0.00	10.00	10.00	0.00	10.00	0.00	5.00
	GP	Profit	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	0.00	0.00	10.00	0.00	0.00
land_pric	LP	Cost	263.00	227.10	176.80	42.50	42.50	48.80	62.10	82.10	425.80	425.80
dem_gro	IPI	Profit	91.71	101.97	87.77	97.56	97.56	97.56	97.56	89.81	86.92	86.92
	GDP	Profit	16666.	24732.	17780.	21879.	21879.	21879.	21879.	20399.	28915.	28915.
	UL	Cost	36.52	23.69	23.01	26.48	26.49	18.11	23.26	21.86	20.43	20.43
mun_ran	PL	Profit	41827.	1045.0	35146.	4610.0	2130.0	179.91	6472.0	19604.	91832.	32335
	PD	Cost	55.82	38.59	1785.8	54.10	88.27	1680.4	454.18	98.27	7652.6	5337.8
acc_rail	NRA	Profit	12.00	3.00	8.00	10.00	8.00	12.00	5.00	5.00	40.00	50.00
	IRE	Profit	6.00	2.00	4.00	6.00	6.00	2.00	8.00	4.00	10.00	10.00
	CD	Profit	4.00	3.00	10.00	4.00	3.00	7.00	4.00	7.00	7.00	22.00
	QR	Profit	10.00	10.00	10.00	10.00	5.00	10.00	10.00	5.00	10.00	10.00
acc_road	DAHCH	Profit	0.00	5.00	10.00	5.00	5.00	10.00	5.00	0.00	10.00	10.00
	DHCR	Cost	9.00	15.00	0.00	16.00	5.00	0.00	4.00	50.00	0.00	0.00
	NL	Profit	4.00	4.00	6.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	10.00	10.00
acc_air	DA	Cost	60.10	36.70	33.30	36.70	124.00	1.40	52.50	120.00	7.70	16.00
acc_port	DP	Profit	7.00	7.00	2.00	7.00	8.00	5.00	5.00	7.00	2.00	2.00
acc_sup	CSS	Profit	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
wea	CV	Profit	5.00	0.00	0.00	0.00	5.00	0.00	0.00	10.00	0.00	0.00
	RL	Cost	551.00	313.00	447.00	774.70	668.00	555.00	455.00	1084.0	436.00	436.00
	WF	Profit	10.00	10.00	10.00	0.00	10.00	0.00	0.00	10.00	10.00	10.00
orog	TC	Profit	10.00	10.00	10.00	2.00	2.00	10.00	10.00	2.00	10.00	10.00
	SL	Cost	0.00	0.00	2.00	3.00	3.00	1.00	0.00	2.00	0.00	0.00
geol	EX	Cost	6.39	0.43	0.00	8.26	0.87	0.43	0.00	0.43	10.00	8.26
	CS	Profit	1950.0	800.00	700.00	2600.0	900.00	800.00	700.00	800.00	3000.0	2600.0
rel_plat	NNLP	Cost	2.00	5.00	27.00	4.00	10.00	7.00	8.00	2.00	12.00	7.00
	NMDLP	Profit	28.00	59.00	100.00	70.00	70.00	100.00	60.00	50.00	120.00	120.00
	BICA	Profit	5.00	10.00	10.00	5.00	5.00	10.00	5.00	5.00	10.00	10.00
sup_cha	DPFC	Cost	98.20	0.00	0.00	25.60	131.00	0.00	0.00	225.00	0.00	0.00
mod_shi	DPPC	Profit	14.00	71.00	36.00	53.00	27.00	63.00	116.00	33.00	54.00	83.00
	NPT	Cost	312.00	1736.0	983.00	625.00	251.00	611.00	1319.0	384.00	800.00	2905.0
	NRADT	Cost	3891.0	20460.	16094.	5871.0	11879.	22388.	11287.	942.00	23932.	56638.
	DTENT	Profit	10.00	5.00	10.00	10.00	5.00	0.00	10.00	10.00	10.00	10.00

ANEXO 5. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE EVALUACIÓN

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA LOCALIZACIÓN DE PUERTOS SECOS

CASik*wk*Wk	Category	Environmental								
	Code	imp_nat				imp_urb		hydro		
	Factor	Impact on natural environment				Impact on urban environment		Hydrology		
Dry Port	Variable	Distance to natural spaces	Connectivity on natural environment	Number of isolated spaces	Density of the facility area	Distance to urban spaces	Connectivity on urban environment	Distance to surface water	Flooding level	Groundwater presence
	Code	DNS	CNE	NIS	DFA	DUS	CUE	DSW	FL	GP
	Type	Profit	Profit	Cost	Profit	Profit	Cost	Profit	Profit	Profit
I		90.000000	0.000000	0.000000	0.000000	143.500000	382.666667	33.288000	438.000000	0.000000
II		54.545455	0.000000	409.500000	0.000000	0.000000	0.000000	87.600000	0.000000	0.000000
III		136.363636	0.000000	273.000000	0.000000	0.000000	191.333333	69.204000	219.000000	0.000000
IV		600.000000	0.000000	136.500000	0.000000	114.800000	382.666667	0.000000	0.000000	0.000000
V		349.090909	0.000000	136.500000	0.000000	114.800000	478.333333	0.000000	438.000000	384.000000
VI		125.454545	0.000000	409.500000	0.000000	0.000000	0.000000	201.480000	438.000000	0.000000
VII		136.363636	0.000000	273.000000	0.000000	200.900000	191.333333	205.860000	0.000000	0.000000
VIII		49.090909	0.000000	273.000000	0.000000	350.140000	382.666667	78.840000	438.000000	384.000000
IX		240.000000	0.000000	0.000000	0.000000	114.800000	0.000000	400.332000	0.000000	0.000000
X		381.818182	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	219.000000	0.000000

CASik*wk*Wk	Category	Economic and social				
	Code	land_price	dem_gro		mun_ran	
	Factor	Land Price	Potential Demand Growth		Hosting municipality range	
Dry Port	Variable	Land price	Industrial production index	Gross Domestic Product	Unemployment rate	Population level
	Code	LP	IPI	GDP	EL	PL
	Type	Cost	Profit	Profit	Cost	Profit
I		242.214000	272.593455	253.606778	0.000000	230.000000
II		278.903800	511.208727	376.347225	230.328191	6.867143
III		330.310400	180.712727	270.558534	242.535764	230.959429
IV		467.565000	408.738909	332.933080	180.241234	30.294286
V		467.565000	408.738909	332.933080	180.241234	13.997143
VI		461.126400	408.738909	332.933080	330.502104	230.000000
VII		447.533800	408.738909	332.933080	238.047686	42.530286
VIII		427.093800	228.235636	310.411897	263.180926	128.826286
IX		75.832400	161.024000	440.000000	288.852735	230.000000
X		75.832400	161.024000	440.000000	288.852735	230.000000

CASik*wk*Wk	Category	Accessability								
	Code	acc_rail			acc_road			acc_air	acc_port	acc_sup
	Factor	Accessability to the rail network			Accessability to high capacity roads network			Accessability to airports	Accessability to ports	Accessability to supplies and services
Dry Port	Variable	Numebr of railways access	Importance of the railway environment	Centrality of demand	Quality of the railway	Direct access to the high capacity network	Distance to a high capacity road	Number of lanes	Distance to an airport	Number of ports nearer than 400 Km
	Code	NRA	IRE	CD	QR	DAHCN	DHCR	NL	DA	DP
	Type	Profit	Profit	Profit	Profit	Profit	Cost	Profit	Cost	Profit
I		550.000000	492.000000	220.000000	0.000000	0.000000	133.200000	333.000000	0.000000	245.000000
II		165.000000	164.000000	165.000000	0.000000	207.000000	0.000000	333.000000	87.780000	245.000000
III		440.000000	328.000000	550.000000	0.000000	414.000000	333.000000	333.000000	110.220000	70.000000
IV		550.000000	492.000000	220.000000	0.000000	207.000000	0.000000	333.000000	87.780000	245.000000
V		440.000000	492.000000	165.000000	0.000000	207.000000	222.000000	333.000000	0.000000	280.000000
VI		550.000000	164.000000	385.000000	0.000000	414.000000	333.000000	333.000000	320.760000	175.000000
VII		275.000000	656.000000	220.000000	0.000000	207.000000	244.200000	333.000000	0.000000	175.000000
VIII		275.000000	328.000000	385.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	245.000000
IX		550.000000	820.000000	385.000000	0.000000	414.000000	333.000000	333.000000	279.180000	70.000000
X		550.000000	820.000000	550.000000	0.000000	414.000000	333.000000	333.000000	224.400000	70.000000

CASik*wk*Wk	Category	Location (I)						
	Code	wea			orog		geol	
	Factor	Weather			Orography		Geology	
Dry Port	Variable	Climatic variety	Rainfall level	Winter frosts	Terrain curl	Slope	Excavability	Compressive strength
	Code	CV	RL	WF	TC	SL	EX	CS
	Type	Profit	Cost	Profit	Profit	Cost	Cost	Profit
I		82.500000	37.716000	84.000000	275.000000	140.000000	209.555556	213.200000
II		0.000000	57.708000	84.000000	275.000000	140.000000	14.260870	87.466667
III		0.000000	46.452000	84.000000	275.000000	70.000000	0.000000	76.533333
IV		0.000000	18.925200	0.000000	55.000000	35.000000	270.956522	284.266667
V		82.500000	27.888000	84.000000	55.000000	35.000000	28.521739	98.400000
VI		0.000000	37.380000	0.000000	275.000000	105.000000	14.260870	87.466667
VII		0.000000	45.780000	0.000000	275.000000	140.000000	0.000000	76.533333
VIII		165.000000	0.000000	84.000000	55.000000	70.000000	14.260870	87.466667
IX		0.000000	47.376000	84.000000	275.000000	140.000000	328.000000	328.000000
X		0.000000	47.376000	84.000000	275.000000	140.000000	270.956522	284.266667

CASik*wk*Wk	Category	Location (II)							
	Code	rel_plat			sup_cha	mod_shi			
	Factor	Relation with other logistics platforms			Integration into the main supply chain infrastructures	Potential optimization of the modal shift			
Dry Port	Variable	Number of near logistic platforms	Number of middle-distance logistic platforms	Belonging to and industrial consolidated area	Distance to a principal freight corridor	Distance to a principal passengers corridor	Number of passengers trips	Nearest roads' ADT	TEN-T Core Network Corridors
	Code	NNLP	NMDLP	BICA	DPFC	DPCC	NPT	NRADT	DTENT
	Type	Cost	Profit	Profit	Cost	Profit	Cost	Cost	Profit
I		121.600000	82.880000	40.000000	33.000000	330.240000	342.758003	57.665400	222.000000
II		76.000000	174.640000	80.000000	231.000000	111.360000	154.525301	47.724000	111.000000
III		0.000000	296.000000	80.000000	264.000000	245.760000	254.061274	50.343600	222.000000
IV		91.200000	207.200000	40.000000	66.000000	180.480000	301.383821	56.477400	222.000000
V		0.000000	207.200000	40.000000	0.000000	280.320000	350.821343	52.872600	111.000000
VI		45.600000	296.000000	80.000000	198.000000	142.080000	303.234423	46.567200	0.000000
VII		30.400000	177.600000	40.000000	165.000000	0.000000	209.646816	53.227800	222.000000
VIII		121.600000	148.000000	40.000000	99.000000	257.280000	333.240620	59.434800	222.000000
IX		0.000000	296.000000	80.000000	297.000000	176.640000	278.251291	45.640800	222.000000
X		45.600000	296.000000	80.000000	330.000000	65.280000	0.000000	26.017200	222.000000

**ANEXO 6. ARTÍCULO JCR QUE DA ACCESO A LA DEFENSA DE LA TESIS
DOCTORAL**

HOW SHOULD THE SUSTAINABILITY OF THE LOCATION OF DRY PORTS BE MEASURED? A PROPOSED METHODOLOGY USING BAYESIAN NETWORKS AND MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS

Samir Awad-Núñez¹, Nicoletta González-Cancelas², Francisco Soler-Flores³,
Alberto Camarero-Orive⁴

^{1,2,4}*Dept of Transportation, Technical University of Madrid, Spain*

³*Dept of Mathematics and Computer Science applied to Civil and Naval Engineering,
Technical University of Madrid, Spain*

Submitted 30 November 2014; resubmitted 2 February 2015; accepted 3 March 2015

Abstract. The global economic structure, with its decentralized production and the consequent increase in freight traffic all over the world, creates considerable problems and challenges for the freight transport sector. This situation has led shipping to become the most suitable and cheapest way to transport goods. Thus, ports are configured as nodes with critical importance in the logistics supply chain as a link between two transport systems, sea and land. Increase in activity at seaports is producing three undesirable effects: increasing road congestion, lack of open space in port installations and a significant environmental impact on seaports. These adverse effects can be mitigated by moving part of the activity inland. Implementation of dry ports is a possible solution and would also provide an opportunity to strengthen intermodal solutions as part of an integrated and more sustainable transport chain, acting as a link between road and railway networks. In this sense, implementation of dry ports allows the separation of the links of the transport chain, thus facilitating the shortest possible routes for the lowest capacity and most polluting means of transport. Thus, the decision of where to locate a dry port demands a thorough analysis of the whole logistics supply chain, with the objective of transferring the largest volume of goods possible from road to more energy efficient means of transport, like rail or short-sea shipping, that are less harmful to the environment. However, the decision of where to locate a dry port must also ensure the sustainability of the site. Thus, the main goal of this article is to research the variables influencing the sustainability of dry port location and how this sustainability can be evaluated. With this objective, in this paper we present a methodology for assessing the sustainability of locations by the use of Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) and Bayesian Networks (BNs). MCDA is used as a way to establish a scoring, whilst BNs were chosen to eliminate arbitrariness in setting the weightings using a technique that allows us to prioritize each variable according to the relationships established in the set of variables. In order to determine the relationships between all the variables involved in the decision, giving us the importance of each factor and variable, we built a K2 BN algorithm. To obtain the scores of each variable, we used a complete cartography analysed by ArcGIS. Recognising that setting the most appropriate location to place a dry port is a geographical multidisciplinary problem, with significant economic, social and environmental implications, we consider 41 variables (grouped into 17 factors) which respond to this need. As a case of study, the sustainability of all of the 10 existing dry ports in Spain has been evaluated. In this set of logistics platforms, we found that the most important variables for achieving sustainability are those related to environmental protection, so the sustainability of the locations requires a great respect for the natural environment and the urban environment in which they are framed.

Keywords: dry ports; industrial location; sustainability; Delphi; Bayesian networks; multi-criteria decision analysis; geographic information systems.

Introduction

The dry port concept is based on moving intermodal terminals inland from port areas. This logistics platform is presented as a solution to the most important problems arising from the accumulation of activities in port

areas: increasing road congestion, lack of open space in port installations and the significant environmental impact of seaports (Rodrigue 2006).

Connecting cargo handling from the port to a logistics centre helps achieve a better port operation, which

leads to a greater efficiency in ship operations (reduction in ship time in port) and to gains in energy efficiency in shipping and, particularly, to operational improvements such as the minimisation of fuel consumption and resulting greenhouse gas emissions (Moon, Woo 2014). It helps also to prevent traffic bottlenecks, thus decreasing road and railway emissions.

In addition, dry ports allow the separation of the various links of the transport chain. Thus, they are also presented as an opportunity to strengthen intermodal solutions as part of an integrated and more sustainable transport chain, allowing for the shortest possible routes for the lowest capacity and most polluting means of transport (Roso 2007; Regmi, Hanaoka 2013).

All these considerations suggest dry ports as a solution that provides a more sustainable logistics supply chain. However, while taking into account the sustainability of the logistics supply chain it is also necessary to ensure the sustainability of the site. The main goal of this article is to investigate the variables influencing the sustainability of dry port location and how this sustainability can be evaluated.

1. State of the Art of Factors Influencing the Location of Dry Ports

The diversity of factors involved in the location of industry has prompted economists over the last century to build models that try to explain the complexity of the real world. For Weber (1929), the main objective when deciding on the location for any industry is to reduce the transport and labour costs. Hotelling (1929) and Reilly (1931) consider the presence of competitors. Christaller (1933) adds the ‘minimum demand threshold’ in order for the location to be profitable. Taking this threshold into account, the best locations are close to large population centres. However, for Lösch (1954), the relationship between population size and type of industry is very important because the impacts on a big population density could lead to social problems. Smith (1979) introduces the concept of ‘subtracted value’, which consists of the negative externalities that must be weighed against the positive. According to Brown (2005), accessibility to and from the centres of origin and destination of the various flows should be maximised, which is achieved through the connection with the transportation and communication systems, generally located alongside transportation facilities forming hubs.

As can be seen, location problems are multi-objective problems and the implications on levels of economic growth, social welfare, environmental acceptability, accessibility and territorial conditions must all be taken into account. From the research of Pons Sánchez (2008), and incorporating the elements described above, the set of variables of this study is presented in Table 1. These 41 variables are grouped into 17 factors, which in turn correspond to 4 categories: environmental factors, economic and social factors, accessibility factors, and location factors. The variables can be considered as either a *benefit*, when a higher value is better in geographical analysis, or a *cost*, when a lower value is better.

2. Bayesian Networks and Multi-Criteria Decision Analysis: a Proposed Mixed Methodology

By triangulating different techniques, we have established a methodology for assessing the sustainability of the location of dry ports that can also be used to evaluate their overall quality.

MCDA has been extensively used to analyse situations that involve many variables, including situations involving location problems (Ho *et al.* 2010).

To reduce the arbitrariness of the weightings of the MCDA algorithm, we decided to use an Artificial Intelligence model based on BNs that establishes the relationship between the variables for a given sample gathered in Table 1.

The proposed methodology has been developed with the following tasks.

Task 1: work setting

Task 1.1. Diagnosis and State of the Art: the first step is reviewing the state of the art to identify the set of variables influencing the quality of the location of dry ports and variables on which they depend.

Task 1.2. Collection of geographic information: In this stage, geographic information of each variable is gathered and entered in the Geographic Information System ArcGIS software, used as a tool to quickly and easily access the required data from an extensive geographic database of several maps.

Task 2: building the model of artificial intelligence

In this paper, we have chosen to use BNs for their ability to represent a causal model using a graphical representation of dependencies between variables that are part of the application domain. They are based on probability theory and combine the power of Bayes’ theorem with the semantic expressiveness of directed graphs. According to the type of structure of the data, different structure-learning methods can be applied. To build the BN we chose a K2 structure-learning algorithm, because it allows the variables to be ordered. This way, the network can be stratified.

Since we cannot enumerate all the possible Directed Acyclic Graphs (DAGs), for the BN structure learning, we have to try heuristic methods. Since DAGs are acyclic and the parents of the variables are before children in causal ordering, knowing the ordering of the variables can reduce the structure space. If we know a complete ordering of the nodes, finding the best structure amounts to picking the best set of parents for each node independently. This is what the K2 algorithm does.

The K2 algorithm is based on the optimization of a measure. This measure is used to explore, using the algorithm, the search space consisting of all networks that contain the variables of the dataset. It starts with an initial network and it is modified (adding or removing paths, or changing their direction) obtaining a new network with the best measure (Cooper, Herskovits 1992).

Table 1. Factors influencing the location of dry ports

Category	Factor	Factor weighting	Variable code	Variable	Kind	Variable weighting
Environmental factors	Impact on natural environment	5.00	DNS	Distance to natural spaces	Profit	10.00
			CNE	Connectivity on natural environment	Profit	0.00
			NIS	Number of isolated spaces	Cost	9.10
			DFA	Density of the facility area	Profit	0.00
	Impact on urban environment	7.25	DUS	Distance to urban spaces	Profit	8.20
			CUE	Connectivity on urban environment	Cost	8.20
	Hydrology	6.00	DSW	Distance to surface water	Profit	7.30
			FL	Flooding level	Profit	7.30
			GP	Groundwater presence	Profit	6.40
Economic and social factors	Land Price	7.00	LP	Land price	Cost	7.30
	Potential demand growth	6.40	IPI	Industrial production index	Profit	6.40
			GDP	Gross Domestic Product	Profit	5.50
			EL	Employment rate	Cost	6.40
	Hosting municipality range	5.00	PL	Population level	Profit	4.60
			PD	Population density	Cost	5.50
Accessibility factors	Accessibility to the rail network	10.00	NRA	Number of railway accesses	Profit	5.50
			IRE	Importance of the railway environment	Profit	8.20
			CD	Centrality of demand	Profit	5.50
			QR	Quality of the railway	Profit	0.00
	Accessibility to high capacity roads network	10.00	DAHNCN	Direct access to the high capacity network	Profit	4.60
			DHCR	Distance to a high capacity road	Cost	3.70
			NL	Number of lanes	Profit	3.70
	Accessibility to airports	5.00	DA	Distance to an airport	Cost	5.50
	Accessibility to ports	10.00	DP	Ports nearer than 400 km	Profit	2.80
	Accessibility to supplies and services	8.00	CSS	Currency of supplies and services	Profit	0.00
Location factors	Weather	3.00	CV	Climatic variety	Profit	5.50
			RL	Rainfall level	Cost	2.80
			WF	Winter frosts	Profit	2.80
	Orography	5.00	TC	Terrain curl	Profit	5.50
			SL	Slope	Cost	2.80
	Geology	5.00	EX	Excavability	Cost	8.20
			CS	Compressive strength	Profit	8.20
	Relation with other logistics platforms	8.00	NNLP	Number of nearby logistic platforms	Cost	1.90
			NMDLP	Number of middle-distance logistic platforms	Profit	3.70
			BICA	Belonging to an industrial consolidated area	Profit	1.00
	Integration into the main supply chain infrastructures	5.50	DPFC	Distance to a principal freight corridor	Cost	5.50
	Potential optimization of the modal shift	5.05	DPPC	Distance to a principal passenger corridor	Profit	6.40
			NPT	Number of passenger trips	Cost	6.40
			NRADT	Nearest roads' ADT	Cost	1.00
			DTENT	Distance to the TEN-T core network corridors	Profit	3.70

Specifically, the K2 algorithm for a network B_S and for data set D , can be written as in Eq. (1):

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

where: N_{ijk} is the number of cases in D for which $X_i (i=1, \dots, n)$ takes its k -th value when Pa_i (X_i parents in B_S) is taken in their j -th instance; q_i is the number of possible instances of all parents; r_i is the number of values that can be taken by X_i .

K2 begins by assuming that a node has no parents, so all structures are equally likely initially. The algorithm then incrementally adds the parent whose addition most increases the score of the resulting structure. For each node, the algorithm searches for the K2 parents that maximize Eq. (2):

$$g(i, Pa_i) = \prod_{j=1}^{q_i} \frac{(r_i - 1)!}{(N_{ij} + r_i - 1)!} \prod_{k=1}^{r_i} (N_{ijk})!. \quad (2)$$

At each step, K2 incrementally adds any parent node whose inclusion increases $g(i, Pa_i)$, when no addition of a single parent can increase the score, it stops adding parents to the node.

As can be seen, K2 is a search algorithm that optimizes the probability of the given network dataset. Actually, this algorithm finds the most likely set of parents, using a Bayesian metric, by measuring the likelihood of the structure given the input data. Its main advantage is that ordering the nodes significantly reduces the search space in comparison with other algorithms because any node, which is below another cannot be its parent. This allows the network structure to be ascertained with reasonable computational resource. Specifically, in this paper we used the K2 algorithm implementation developed in the program Elvira (Elvira Consortium 2002).

Task 3: establishment of weightings

Task 3.1. Weightings of the variables: to obtain the weighting of each variable, the factors were classified according to their strata relative to the root node of

the network, and thresholds were defined based on the ‘depth’ of the factor within the network. Each factor is weighted according to both its importance and its depth.

Task 3.2. Weighting of the factors: these are established by applying the Delphi methodology. This technique was chosen for its ability to reach consensus in a group of experts from many different specialties (the panel included more than 60 experts from the different disciplines that come together in this research: logistics, sustainability, environmental impact, transport planning and geography), something very important in a multi-disciplinary problem such as that presented in this work.

Task 4: establishment of scores based on geographic information analysis

Task 4.1. Standardised Score of geographic information: the variables are sourced from geographic information, and as such, each variable has a different range of possible values. To normalize the measures and to make all correspond to a scale from 0 to 10, we used a spline interpolation. The obtained Criteria Assessment Score, $f_k = f(x_1^i, x_2^i, \dots, x_j^i) = f(x_j^i)$ was normalized by using a spline:

$$P[f_k(x_j^i)] = \lambda_1 [f_k(x_1^i, x_2^i, \dots, x_j^i)]^n + \lambda_2 [f_k(x_1^i, x_2^i, \dots, x_j^i)]^{n-1} + \lambda_n f_k(x_1^i, x_2^i, \dots, x_j^i) + \lambda_{n+1}. \quad (3)$$

Spline interpolation is often preferred over polynomial interpolation because the interpolation error can be made small even when using low degree polynomials for the spline. We used three different kinds of boundary conditions in order to obtain the different degrees of the spline (Table 2).

The kind of interpolation is selected by minimizing the distance between the Measured Criteria Assessment Score (MCAS) and the Standardised Criteria Assessment Score (SCAS), thereby reducing the interpolation error. When linear interpolation had a big error, we used quadratic interpolation (with a maximum in the highest MCAS). When this second approximation failed to reduce the error sufficiently, we used cubic interpolation, with at least two inflection points in the extremes.

Table 2. Spline interpolation boundary conditions

Interpolation	Boundary conditions
Linear	$P\left\{\max\left[f_k(x_j^i)\right]\right\} = 10$; $P\left\{\min\left[f_k(x_j^i)\right]\right\} = 0$
Quadratic	$P\left\{\max\left[f_k(x_j^i)\right]\right\} = 10$; $P\left\{\min\left[f_k(x_j^i)\right]\right\} = 0$; $P'\left\{\max\left[f_k(x_j^i)\right]\right\} = 0$
Cubic	$P\left\{\max\left[f_k(x_j^i)\right]\right\} = 10$; $P\left\{\min\left[f_k(x_j^i)\right]\right\} = 0$; $P''\left\{\max\left[f_k(x_j^i)\right]\right\} = 0$; $P''\left\{\min\left[f_k(x_j^i)\right]\right\} = 0$

Task 5: application of the linear weighted multi-criteria decision analysis algorithm

Using the weightings obtained in Task 3 and the SCAS of Task 4, and then from Eq. (4), the quality of the location of dry ports is obtained:

$$LQR_i = EP \cdot \sum (SCAS_{ik} \cdot w_k) \cdot W_{\bar{k}};$$

$$EP \in N(0,1);$$

$$i \in N(1, \dots, 10); k \in N(1, \dots, 17); \bar{k} \in N(1, \dots, 40), \quad (4)$$

where: LQR_i (Location Quality Rate) is the ratio of the quality of each location; EP (Environmental Protection) is the dichotomous function 'Environmental Protection', which serves to exclude protected areas (worth 0 for protected locations and 1 for locations without environmental protection); $SCAS_{ik}$ (Standardised Criteria Assessment Score) is the score of the evaluation criteria for each variable and location. Finally, w_k are the weightings of each variable obtained by depth compared with the root of the BN and the $W_{\bar{k}}$ are the weightings obtained in the DELPHI questionnaire to fix the importance of each factor. The locations with a higher LQR value will be most appropriate for solving the problem.

3. Case of Study: Sustainability of the Existing Dry Ports in Spain

Spain is a country located in South-Western Europe. Its infrastructure network is established as a mesh with a substantially radial layout centred on Madrid. The country has invested heavily in a network of high speed rail for travellers, which has freed up capacity on the well-maintained conventional rail network, to transport goods from the ports to the hinterland. However, this infrastructure is underutilized (the railroad moves less than 5% of all goods in the country), partly because of poor planning.

There is also a widely held view that railway transport is the most sustainable land transport and its use should be increased (Roso *et al.* 2009). Linking these two aspects, and considering that dry ports are presented as an opportunity to strengthen intermodal solutions as part of an integrated transport chain (McCalla 2007), we decided to assess the quality of the locations of dry ports to lay the foundation to develop public policies into an overall national logistics plan focused on the railway transport and sustainability aspects.

Results and Discussion

Eq. (4) requires the following inputs: (1) the weightings of each variable and factor and (2) the SCAS of each variable and location.

Using the geographic information of the 10 existing dry ports in Spain, a K2 BN algorithm was built. The result determines the relationship between all the variables involved in the decision. The network obtained is represented in Fig. 1.

As can be seen, DNS is the root node of the whole network because no path enters it. By assessing the importance of each variable by depth compared with the root of the network, a certain weighting is set for each variable. Depth is related to the number of steps to reach DNS and the number of relationships between the evaluated variable and the other variables. Table 3 shows the results of this procedure.

The four conditionally independent variables are unrelated to the rest of the network variables. These variables have been given a weighting $w_k = 0$. This is because, in our case study, these four variables have similar values for all locations, which precludes any analysis of the quality or suitability of these variables. Therefore, they do not serve our purpose of classifying the quality of the locations.

Fig. 1. K2 algorithm Bayesian Network

Table 3. Layer distribution of each variable according to depth on Bayesian Network

Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Out
Variables	DNS	NIS	DUS	DSW	GP	GDP	PL	DTENT	RL	NNLP	BICA	CNE
			CUE	FL	EL	PD	DAHNCN	NMDLP	SL		NRADT	DFA
			CS	LP	IPI	DPFC	LQR	DHCR	WF			QR
			EX		DPPC	CV		NL	DP			CSS
			IRE		NPT	TC						
						NRA						
						DA						
						CD						
Weighting	10	9.1	8.2	7.3	6.4	5.5	4.6	3.7	2.8	1.9	1	0
Key		Environmental		Economic and social		Location		Accessibility		LQR		

In order to obtain the weightings of the factors we used a Delphi questionnaire. In Table 1, the weightings of each factor are compiled. Awad-Núñez *et al.* (2014) shows the survey results of the Delphi methodology. As shown in that paper, only 14 factors were employed, compared with 17 considered in this research. The weightings of the 3 additional factors were obtained through missing data analysis techniques, maintaining the weightings of the factors that are known and their importance as given by the questionnaire. It has been inferred by propagation probability, for which there are various algorithms that take advantage of independence encoded by the network to perform calculations efficiently (Nilsson 1998). The propagation of probability is used to obtain the posterior probabilities of certain network variables when the value taken by some other observed variables is known:

- What is the probability of a given value assignment for a subset of variables Y ?
- What is the probability of different value assignments for query variables Y given evidence about variables Z ?

Each network node corresponds to a discrete variable, $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, with its respective conditional probability matrix, $P(B|A) = P(B_i | A_i)$. Given some evidence E (represented by a fixed value from the questionnaire), the posterior probability of any other variable B is, according to Bayes' theorem,

$$P(B_i|E) = \frac{P(B_i) \cdot P(E|B_i)}{P(E)}$$

In classification, given the training data and a new example, we want to determine the most probable class label of the new example. Given a BN and a random variable B , deciding whether $P(B=b|E) > 0$ is NP-hard. This implies that there is no general inference procedure that will work efficiently for all network configurations. However, for particular families of networks, inference can be done efficiently. In other cases, instead of exact inference (computing the probabilities exactly) we will use approximate inference (computing the probabilities with reasonable precision).

Applying Eq. (4), with the weighting from Table 1 and the SCAS from the geographic information analysis using ArcGIS (Table 4); we obtained the results compiled in Table 5.

Table 4. Compilation of Standardised Criteria Assessment Score

Variable	SCAS									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
DNS	1.5	0.9	2.3	10.0	5.8	2.1	2.3	0.8	4.0	6.4
CNE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NIS	0.0	7.5	5.0	2.5	2.5	7.5	5.0	5.0	0.0	0.0
DFA	10.0	10.0	0.0	0.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
DUS	2.5	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	3.5	6.1	2.0	0.0
CUE	6.7	0.0	3.3	6.7	8.3	0.0	3.3	6.7	0.0	0.0
DSW	0.8	2.0	1.6	0.0	0.0	4.6	4.7	1.8	9.1	0.0
FL	10.0	0.0	5.0	0.0	10.0	10.0	0.0	10.0	0.0	5.0
GP	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0
LP	4.7	5.5	6.5	9.2	9.2	9.0	8.8	8.4	1.5	1.5
IPI	5.3	10.0	3.5	8.0	8.0	8.0	8.0	4.5	3.1	3.1
GDP	5.8	8.6	6.1	7.6	7.6	7.6	7.6	7.1	10.0	10.0
EL	0.0	4.5	4.7	3.5	3.5	6.5	4.6	5.1	5.6	5.6
PL	10.0	0.3	10.0	1.3	0.6	10.0	1.8	5.6	10.0	10.0
PD	9.4	9.6	0.0	9.5	9.1	0.0	5.5	9.0	0.0	0.0
NRA	10.0	3.0	8.0	10.0	8.0	10.0	5.0	5.0	10.0	10.0
IRE	6.0	2.0	4.0	6.0	6.0	2.0	8.0	4.0	10.0	10.0
CD	4.0	3.0	10.0	4.0	3.0	7.0	4.0	7.0	7.0	10.0
QR	10.0	10.0	10.0	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0	10.0	10.0
DAHNCN	0.0	5.0	10.0	5.0	5.0	10.0	5.0	0.0	10.0	10.0
DHCR	4.0	0.0	10.0	0.0	6.7	10.0	7.3	0.0	10.0	10.0
NL	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	0.0	10.0	10.0
DA	0.0	2.7	3.3	2.7	0.0	9.7	0.0	0.0	8.5	6.8
DP	8.8	8.8	2.5	8.8	10.0	6.3	6.3	8.8	2.5	2.5
CSS	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
CV	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0
RL	4.5	6.9	5.5	2.3	3.3	4.5	5.5	0.0	5.6	5.6
WF	10.0	10.0	10.0	0.0	10.0	0.0	0.0	10.0	10.0	10.0
TC	10.0	10.0	10.0	2.0	2.0	10.0	10.0	2.0	10.0	10.0
SL	10.0	10.0	5.0	2.5	2.5	7.5	10.0	5.0	10.0	10.0
EX	6.4	0.4	0.0	8.3	0.9	0.4	0.0	0.4	10.0	8.3
CS	6.5	2.7	2.3	8.7	3.0	2.7	2.3	2.7	10.0	8.7

End of Table 4

Variable	SCAS									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
NNLP	8.0	5.0	0.0	6.0	0.0	3.0	2.0	8.0	0.0	3.0
NMDLP	2.8	5.9	10.0	7.0	7.0	10.0	6.0	5.0	10.0	10.0
BICA	5.0	10.0	10.0	5.0	5.0	10.0	5.0	5.0	10.0	10.0
DPFC	1.0	7.0	8.0	2.0	0.0	6.0	5.0	3.0	9.0	10.0
DPPC	8.6	2.9	6.4	4.7	7.3	3.7	0.0	6.7	4.6	1.7
NPT	8.9	4.0	6.6	7.8	9.1	7.9	5.5	8.7	7.2	0.0
NRADT	9.6	8.0	8.4	9.4	8.8	7.8	8.9	9.9	7.6	4.3
DTENT	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0	0.0	10.0	10.0	10.0	10.0

Notes: I – Antequera; II – Santander-Ebro (Luceni); III – Azuqueca de Henares; IV – La Robla; V – Toral de los Vados; VI – Villafria (Burgos); VII – Venta de Baños (Ventasur); VIII – Monforte de Lemos; IX – Coslada; X – Abroñigal.

Each dry port presents a weighted score for each category: environmental, economic and social accessibility and location. Merging the results of the environmental and economic and social variables, we obtained the sustainability of each dry port. Taking into account all the full set of variables quality can be observed.

The best dry port in each category in Table 5 is highlighted in green and the worst one is highlighted in red. For easier understanding of the explanation of the results, these are gathered in Fig. 2.

The most sustainable dry port is Monforte de Lemos, which scored well in terms of social and environmental factors and was balanced in the economic section with 60.3% of the maximum possible score. Meanwhile, the least sustainable locations are Coslada, Abroñigal and Santander-Ebro – all of them with low social and environmental scores that are not compensated by the economic section.

Fig. 2. Bar chart gathering the main results

For its part Coslada has the best quality location if all the variables are taken into account, with 57.2%.

These modest results show that both sustainability and quality of dry port locations in Spain is moderate. This can also be seen in the median values, of 41.3% and 48.8% respectively.

Analysing sustainability, scores in economic and social variables are much better than in environmental variables. As environmental variables, appear to be the ones with the biggest weightings, this produces moderate sustainability ratings. In addition, the set of sustainability assessments of the locations has a standard deviation of 11.1%, so it can be considered that the quality of the locations is grouped around the central values.

By looking at the overall quality of the locations (taking into account LQR value), we saw that dry ports have higher grades than 60% in accessibility and higher than 50% in location. However, as was the case for sustainability, these ratings are not able to pull up the overall rating because the environmental variables are the most weighted of the model. Again, we can say that there is little dispersion in the sample, in this case with a standard deviation of 6%.

Table 5. MCDA algorithm results

	Environmental		Economic and social		Accessibility		Location		Sustainability		Quality (LQR)	
I	1091.2	32.1%	1152.8	52.7%	2025.0	55.1%	2224.2	67.8%	2244.1	40.1%	6022.0	48.0%
II	474.3	13.9%	1444.5	66.0%	1412.2	38.4%	1583.6	48.2%	1918.8	34.3%	4827.0	38.5%
III	827.5	24.3%	1116.3	51.0%	2679.9	72.9%	1839.0	56.0%	1943.8	34.8%	6174.5	49.2%
IV	1129.0	33.2%	1495.5	68.4%	2180.2	59.3%	1841.8	56.1%	2624.5	46.9%	6646.5	53.0%
V	1841.0	54.1%	1469.8	67.2%	2223.7	60.5%	1359.4	41.4%	3310.8	59.2%	6071.8	48.4%
VI	1085.3	31.9%	1548.9	70.8%	2741.3	74.6%	1561.6	47.6%	2634.1	47.1%	6297.6	50.2%
VII	953.2	28.0%	1423.9	65.1%	2197.3	59.8%	1363.8	41.6%	2377.2	42.5%	5732.5	45.7%
VIII	1928.2	56.6%	1445.4	66.1%	1233.0	33.6%	1635.4	49.8%	3373.6	60.3%	5341.2	42.6%
IX	719.2	21.1%	1017.7	46.5%	3257.7	88.6%	2622.8	79.9%	1737.0	31.1%	7217.0	57.5%
X	537.2	15.8%	1017.7	46.5%	3377.0	91.9%	2228.2	67.9%	1554.9	27.8%	6941.1	55.3%
Average	1058.6	31.1%	1313.3	60.0%	2332.7	63.5%	1826.0	55.6%	2371.9	42.4%	6127.1	48.8%
Median	1019.3	29.9%	1434.2	65.6%	2210.5	60.1%	1737.2	52.9%	2310.6	41.3%	6123.2	48.8%
Std Dev	373.2	11.0%	338.3	15.5%	662.2	18.0%	561.5	17.1%	623.0	11.1%	754.4	6.0%
Max	3404.0		2187.2		3675.0		3282.3		5591.2		12548.5	

Notes: I – Antequera; II – Santander-Ebro (Luceni); III – Azuqueca de Henares; IV – La Robla; V – Toral de los Vados; VI – Villafria (Burgos); VII – Venta de Baños (Ventasur); VIII – Monforte de Lemos; IX – Coslada; X – Abroñigal.

Conclusions and Future Research

In this paper, we have tried to convey the idea that the determination of the most appropriate location to place dry ports is a geographic and multidisciplinary problem with environmental, economic, social, accessibility and location repercussions.

Although the results of the Delphi questionnaire show a greater importance in the search for the location of a dry port for the aspects considered in the classical theories of industrial location (accessibility to the rail network, accessibility to high-capacity main roads and accessibility to seaports), the Delphi weightings are corrected according to the relationships established between variables by taking into account the Bayesian weightings. Ultimately, environmental variables prove to be the most important in deciding the location. Also, although the four conditionally independent variables (Connectivity with the natural environment, Density of facility area, Quality of the railway, Currency of supplies and services) are unrelated to the rest of the network. We must not lose sight of these variables in future evaluations since new input values would vary the relationship between them and the rest of the BN.

A very important conclusion is that the satisfactory results allow us to confirm the great power of applying BNs and MCDA to the assessment of dry port location. In addition, the triangulation of different independent techniques provides greater confidence in the results, because the use of BNs and Delphi methodology reduces the arbitrariness of the weightings of the MCDA algorithm.

By implementing the MCDA algorithm into a McHarg Geographic Information System, we will be able to develop a powerful decision-making tool. Furthermore, the versatility of the model will allow with small changes in the variables, the location of other logistics platforms or NIMBY facilities other than dry ports.

References

- Awad-Núñez, S.; González-Cancelas, N.; Camarero-Orive, A. 2014. Delphi methodology used for determining weighting factors influencing the location of Dry Ports, *News in Engineering* 2(2): 55–62.
- Brown, N. D. 2005. *La teoría de la localización*. Universidad de Barcelona. 73 p. Available from Internet: http://riscd2.eco.ub.es/~nduch/postgrau_archivos/Duch_localizacion.pdf (in Spanish).
- Christaller, W. 1933. *Central Places in Southern Germany*. Prentice Hall. 230 p.
- Cooper, G. F.; Herskovits, E. 1992. A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data, *Machine Learning* 9(4): 309–347. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00994110>
- Elvira Consortium. 2002. ELVIRA: an environment for probabilistic graphical models, in J. Gámez, A. Salmerón (Eds.). *Proceedings of the First European Workshop on Probabilistic Graphical Models (PGM'02)*, 222–230.
- Ho, W.; Xu, X.; Dey, P. K. 2010. Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: a literature review, *European Journal of Operational Research* 202(1): 16–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.009>
- Hotelling, H. 1929. Stability in competition, *The Economic Journal* 39(153): 41–57. <http://dx.doi.org/10.2307/2224214>
- Lösch, A. 1954. *The Economics of Location*. Translated from the 2nd revised edition by W. H. Woglom, W. F. Stolper. Yale University Press. 520 p.
- McCalla, R. J. 2007. Factors influencing the landward movement of containers: the cases of Halifax and Vancouver, in J. Wang, D. Olivier, T. Notteboom, B. Slack (Eds.). *Ports, Cities and Global Supply Chain*, 121–137.
- Moon, D. S.-H.; Woo, J. K. 2014. The impact of port operations on efficient ship operation from both economic and environmental perspectives, *Maritime Policy & Management: the Flagship Journal of International Shipping and Port Research* 41(5): 444–461. <http://dx.doi.org/10.1080/03088839.2014.931607>
- Nilsson, D. 1998. An efficient algorithm for finding the M most probable configurations in probabilistic expert systems, *Statistics and Computing* 8(2): 159–173. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008990218483>
- Pons Sánchez, A. 2008. *Localizaciones óptimas para puertos secos*: PhD Thesis. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio, Universidad Politécnica de Cataluña, Spain. 126 p. Available from Internet: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/5917> (in Spanish).
- Regmi, M. B.; Hanaoka, S. 2013. Location analysis of logistics centres in Laos, *International Journal of Logistics Research and Applications: a Leading Journal of Supply Chain Management* 16(3): 227–242. <http://dx.doi.org/10.1080/13675567.2013.812194>
- Reilly, W. J. 1931. *The Law of Retail Gravitation*. New York, USA.
- Rodrigue, J.-P. 2006. Transportation and the geographical and functional integration of global production networks, *Growth and Change* 37(4): 510–525. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-2257.2006.00338.x>
- Roso, V. 2007. Evaluation of the dry port concept from an environmental perspective: a note, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 12(7): 523–527. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2007.07.001>
- Roso, V.; Woxenius, J.; Lumsden, K. 2009. The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland, *Journal of Transport Geography* 17(5): 338–345. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.10.008>
- Smith, M. W. 1979. The economics of physician location, in *Proceedings of Western Regional Conference of American Association of Geographers*, 1979, Chicago, Illinois, USA.
- Weber, A. 1929. *Theory of the Location of Industries*. Translated by C. J. Friedrich from Weber's 1909 book. Chicago: The University of Chicago Press.