

# Investigación

## Evaluación gráfica de la sostenibilidad portuaria: redes de decisión

### Graphical evaluation of port sustainability: decision networks

Beatriz Molina Serrano, Nicoleta González-Cancelas, Francisco Soler-Flores,  
Alberto Camarero Orive y Alfonso Camarero Orive

Revista de Investigación



Volumen VII, Número 2, pp. 005-020, ISSN 2174-0410  
Recepción: 1 Jun'17; Aceptación: 2 Sep'17

1 de octubre de 2017

#### Resumen

Las cuatro patas en las que se sustenta la sostenibilidad portuaria hacen muy ardua la tarea de encontrar una metodología que haga que su aplicación práctica resulte fácil. Es por ello que, conociendo las variables asociadas a la sostenibilidad portuaria, se han obtenido las relaciones entre las mismas a través de la construcción de una red bayesiana. La teoría de la utilidad vinculada a las redes bayesianas proporciona un marco para la toma de decisiones utilizando diagramas de influencia o redes de decisión, los cuales se han empleado en el presente trabajo para conocer las influencias positivas y negativas que se producen entre dichas variables.

**Palabras Clave:** Evaluación gráfica, redes de decisión, diagramas de influencia, redes bayesianas

#### Abstract

The four legs on which port sustainability is based make it very difficult to find a methodology that makes its practical application easy. For this reason, by knowing variables associated with port sustainability we have obtained the relationship between them through the construction of a Bayesian network. Utility theory linked to Bayesian networks provides a framework for decision making by means of influence diagrams or decision networks, which have been used in the present work to know the positive and negative influences that occur between these variables.

**Keywords:** Graphical evaluation, decision networks, influence diagrams, Bayesian networks

## 1. Introducción

El desarrollo sostenible sigue siendo en la actualidad un concepto amplio, abstracto o ambiguo [5], que ha ido evolucionando con el paso de los años. Su incorporación fue en la década de los 70 del siglo pasado en la Conferencia de Estocolmo que se celebró en el año 1972. Allí, se puso de manifiesto la existencia de problemas medioambientales globales como consecuencia del crecimiento de la población y de la escasez de recursos naturales [13].

Posteriormente, en el año 1987, con el Informe Brundtland, el concepto de desarrollo sostenible adopta su definición más conocida, definiéndose como “el desarrollo que asegura las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para enfrentarse a sus propias necesidades” [26].

Este hecho supuso un cambio social, ambiental y económico importante al incluir cuestiones medioambientales que nunca antes habían sido debatidas, las cuales se consolidaron en la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro en 1992, donde el desarrollo sostenible era el tema central del debate [2]. El resultado principal de dicha cumbre, además de la creación de una Comisión para el Desarrollo Sostenible, fue un documento titulado Agenda 21, en el que se desarrolló una estrategia general de desarrollo sostenible para todo el mundo.

Posteriormente, esta visión siguió ampliándose a otras dimensiones, de forma que la definición ha evolucionado con el paso del tiempo, pues cada vez que se estudia el tema se involucran más áreas del conocimiento [12]. Es por ello que en la actualidad este concepto posee un carácter integral, multidimensional e interactivo, abarcando la dimensión institucional, dimensión económica, dimensión social y dimensión ambiental, tal y como se refleja en la Figura 1.

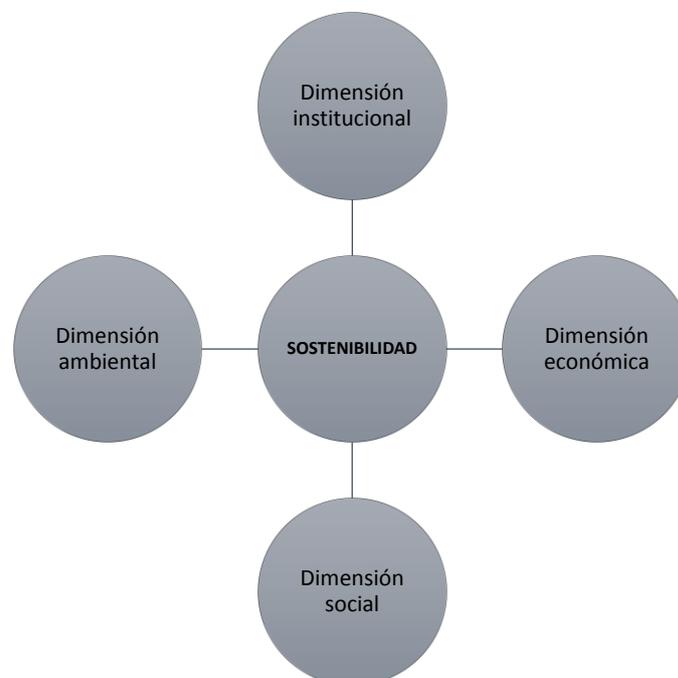


Figura 1. Dimensiones de la sostenibilidad. Fuente: [15]

En el caso del sector transportes el concepto de desarrollo sostenible se está aplicando de forma emergente, impulsado por iniciativas que incorporan la variable ambiental y la responsabilidad social empresarial en la gestión estratégica de las empresas [6]. El objetivo a largo plazo es el mantenimiento equilibrado de su función, buscando un desarrollo equilibrado de la dimensión económica, social, ambiental e institucional [22].

El transporte de mercancías es una operación de gran importancia en la economía general a nivel mundial [19], mereciendo una atención particular el transporte marítimo, al transportar alrededor del 80% de las mercancías a nivel mundial [20].

La sostenibilidad portuaria tiene sus raíces en las propuestas del GRI (Global Reporting Initiative) [8] de las cuales conserva, entre otras cuestiones, los cuatro ejes o dimensiones que conforman un enfoque de desarrollo sostenible, es decir, las reflejadas en la Figura 1. Es por ello que se debe entender la gestión sostenible como “aquella que permite que crezca el volumen de tráfico de contenedores, graneles sólidos y líquidos, mercancía general y número de pasajeros, disminuyendo a su vez el consumo de energía y recursos naturales, el volumen de residuos generados y los impactos negativos a los sistemas sociales y ecosistemas en las áreas de influencia del puertos” [3].

Esta demanda de la sociedad de caminar hacia un desarrollo sostenible, traducido en una exigencia a las organizaciones de una mayor transparencia en la información que suministra ha llevado a los puertos a implementar de forma voluntaria normativas relacionadas con la sostenibilidad, y programas de Responsabilidad Social Empresarial. En algunos casos, la información se facilita a través de Memorias/Informes de Sostenibilidad/Balances Sociales, que más allá de los Estados Financieros convencionales, responden a una triple realidad de la organización: económica, social y medioambiental [21].

En el caso particular del sector portuario español, las memorias de sostenibilidad ofrecen información que va más allá de la económico-financiera [4], por lo que constituye una herramienta de análisis y diagnóstico al describir los resultados mediante el uso de indicadores de calidad que abarcan las cuatro dimensiones anteriormente citadas. Asimismo, estos indicadores también resultan útiles a las Autoridades Portuarias para:

- controlar que su manejo sea sostenible
- evaluar los impactos derivados del programa aplicado
- modificarlos cuando sea necesario
- llevar a cabo una evaluación comparativa de la gestión de los distintos puertos, desde el punto de vista de la sostenibilidad, para poder definir las mejores prácticas y comparar el rendimiento de la Autoridad Portuaria con el de industrias similares.

Por tanto, su aplicación generalizada en un sistema portuario es útil para realizar un benchmarking preciso en sostenibilidad entre los puertos de la misma región o país [9].

A partir de estos indicadores, los objetivos que debe alcanzar una autoridad portuaria o empresa para asegurar un desarrollo y crecimiento sostenible son los que se muestran en la Figura 2, abarcando las cuatro dimensiones. El objetivo final que se persigue es llegar a que los puertos se consideren como elementos de un sistema que se interrelacionan con un entorno físico, social y ambiental, y dejen de ser vistos como entes aislados sujetos a una coyuntura comercial concreta [17].

<b>Objetivos económicos</b>	Incrementar el volumen de negocio
	Aumentar los ingresos por concesiones
	Reducir el endeudamiento con el fin de asegurar la sostenibilidad financiera del puerto
	Optimizar y rentabilizar las inversiones de los activos portuarios
<b>Objetivos ambientales</b>	Accionar con respeto al medio ambiente
	Minimizar los impactos ambientales derivados de la actividad portuaria
	Minimizar los accidentes ambientales
	Mejorar la gestión ambiental en el recinto portuario
<b>Objetivos institucionales</b>	Impulsar cambios legales para modernizar el desarrollo del puerto
	Reorganizar el mercado incorporando competencia
	Desarrollar la comunidad portuaria para incrementar la eficiencia
	Institucionalizar la relación ciudad-puerto
	Expandir la gestión operativa del puerto a la cadena logística
<b>Objetivos sociales</b>	Desarrollar y modernizar sistemas de gestión de los recursos humanos
	Desarrollar un equipo humano motivado y comprometido
	Lograr un respaldo sostenido y activo de la comunidad del entorno

Figura 2. Relación de los principales objetivos que debe alcanzar una autoridad portuaria o empresa para asegurar un desarrollo y crecimiento sostenible. Fuente: (Molina, et. al, 2016)

Sin embargo, la aplicación del concepto de sostenibilidad portuaria se topa con una escasez de metodologías que permitan evaluar el impacto de las actuaciones de las instituciones y empresas en cada una de estas cuatro dimensiones, determinando el valor y las variables que cuantifiquen la verdadera contribución de esa gestión al desarrollo sostenible. No obstante, en las últimas décadas se han desarrollado numerosas técnicas para el análisis y modelización de los datos en diferentes áreas de la estadística y de la inteligencia artificial [18], sobre todo en el caso de redes neuronales, cuyas investigaciones son muy populares [11]. La aplicación de estas disciplinas se extiende también a numerosos ámbitos comerciales y de investigación en problemas de predicción, clasificación o diagnóstico [25].

Dentro de las metodologías, las Redes Bayesianas o redes probabilísticas permiten modelizar de forma conjunta toda la información relevante para un problema dado y utilizar posteriormente mecanismos de inferencia probabilística para obtención de conclusiones en base a la evidencia disponible [24]. Es por ello que conforman una de las posibilidades puesto que la lógica bayesiana se basa en las estadísticas y las probabilidades condicionales para predecir el futuro [14], permitiendo obtener de una forma gráfica las relaciones entre las variables de cada una de las cuatro dimensiones y determinar a posteriori los valores que cuantifiquen su contribución a la sostenibilidad.

En la línea de trabajo de comportamiento de redes neuronales, en el campo de la gestión portuaria, se han desarrollado en los últimos años varios estudios, entre los que se encuentra la referencia [19] que usó como herramienta el programa MATLAB. Dicho estudio se desarrollaba en el ámbito de las terminales de contenedores, en concreto, en el estudio de posibles crecimientos de tráfico y de las necesidades de equipos para poder mover los contenedores estimados.

La presente investigación, siguiendo una metodología similar a la expuesta en dicha referencia, avanza un paso más usando el software Elvira, y analiza las relaciones entre las variables que intervienen en la sostenibilidad portuaria, permitiendo llevar a cabo una toma de decisiones, al tiempo que muestra la necesidad de incorporar elementos sostenibles dentro de las herramientas empleadas por las Autoridades Portuarias.

## 2. Metodología y resultados obtenidos

El aprendizaje es una de las características que definen a los sistemas basados en inteligencia artificial, pues siendo estrictos, se puede afirmar que sin aprendizaje no hay inteligencia. Sin embargo, es difícil definir el término “aprendizaje”, pero la mayoría de las autoridades en el campo coinciden en que es una de las características de los sistemas adaptativos que son capaces de mejorar su comportamiento en función de su experiencia pasada, por ejemplo al resolver problemas similares [23].

Los modelos gráficos probabilísticos son gráficos en los que los nodos representan variables aleatorias, y los arcos (o la falta de ellos) representan supuestos de independencia condicional. Por lo tanto, proporcionan una representación compacta de distribuciones de probabilidad conjuntas.

Existen dos tipos de modelos gráficos:

- Los modelos gráficos no dirigidos, también llamados Markov Random Fields (MRF) o redes de Markov, tienen una definición simple de independencia, de modo que dos nodos o conjunto de nodos A y B son condicionalmente independientes dado un tercer conjunto, C, si todos los caminos entre los nodos en A y B están separados por el nodo en C.

Este tipo de modelo es más popular entre las comunidades de físicos y ópticos.

- Los modelos gráficos dirigidos también llamados redes bayesianas o redes de creencias (BNs), tienen una noción más complicada de la independencia que los modelos gráficos no dirigidos, pues se tiene en cuenta la direccionalidad de los arcos, como explicamos a continuación.

Estos modelos son más populares entre las comunidades de informáticos y estadísticos.

Aunque, como se ha visto anteriormente, los modelos dirigidos tienen una noción más complicada de independencia que los modelos no dirigidos, estos modelos cuentan con varias ventajas. Lo más importante es que se puede considerar un arco de A a B como indicando que A "causa" B. Esto se puede usar como una guía para construir la estructura del gráfico. Además, los modelos dirigidos pueden codificar relaciones deterministas, y son más fáciles de aprender (ajustar a los datos).

Para profundizar más en modelos gráficos dirigidos y no dirigidos, véanse las referencias [16], [1] y [7].

Además de la estructura gráfica, es necesario especificar los parámetros del modelo. Para un modelo dirigido, es necesario especificar la distribución de probabilidad condicional (CPD) en cada nodo. En el caso de variables discretas, esto se puede presentar como una tabla (CPT),

que enumere la probabilidad de que el nodo secundario asuma cada uno de sus valores diferentes para cada combinación de valores de sus padres.

El obtener una red bayesiana a partir de unos datos determinados es un proceso de aprendizaje que se divide en dos etapas: el aprendizaje estructural y el aprendizaje paramétrico, [16]. La primera de ellas consiste en obtener la estructura de la red bayesiana, es decir, las relaciones de dependencia e independencia entre las variables involucradas. La segunda etapa tiene como finalidad obtener las probabilidades a priori y condicionales requeridas a partir de una estructura dada.

Al tratar el tema de aprendizaje en redes bayesianas, es importante tener presente que distintos grafos pueden ser probabilísticamente equivalentes, es decir, pueden representar las mismas relaciones de dependencia e independencia y/o las mismas distribuciones conjuntas para sus variables. Por ello, haciendo uso de la noción de independencia, o equivalencia de distribuciones, se puede obtener una división en clases de equivalencia del conjunto de todos los grafos dirigidos posibles de  $n$  variables.

Hay dos métodos principales para construir la red. El primero de ellos consiste en realizar, a partir de las frecuencias observadas en la base de datos, una estimación de la distribución de probabilidad que rige el mundo real; las relaciones de dependencia e independencia probabilista de dicha distribución indican cuál debe ser la estructura del grafo. Es decir, se trata de buscar un grafo que sea mapa de independencias de la distribución de probabilidad. Naturalmente, puede haber más de una solución, pues como hemos comentado existen grafos equivalentes en sentido probabilista, es decir, grafos que representan las mismas relaciones de independencias y de (posibles) dependencias.

El otro método de aprendizaje estructural consiste en realizar una búsqueda heurística utilizando alguna medida de calidad: en general, se parte de una red sin enlaces y se van añadiendo enlaces uno a uno hasta que la red representa adecuadamente la distribución de probabilidad obtenida de la base de datos. También en este método hay que tener en cuenta la existencia de grafos equivalentes en sentido probabilista.

Existen varias alternativas para obtener los parámetros necesarios de una red, siendo estas las que se enumeran a continuación:

- Especificación de los parámetros, normalmente contando con la ayuda de expertos. Se trata de un proceso costoso.
- Aprendizaje a partir de las bases de datos, que obviamente depende de la existencia de dicha base de datos. Para ello existen dos opciones:
  - a) aprendizaje paramétrico, si se dispone de la estructura
  - b) aprendizaje estructural, en el que es posible aprender tanto la estructura como los parámetros.
- Combinar especificación y aprendizaje. Por ejemplo, contar con expertos que ayuden a especificar la estructura, realizar el aprendizaje paramétrico y, por otro lado, disponer de expertos para supervisar el modelo obtenido. Esta última alternativa aúna las ventajas de cada caso.

## 2.1 Aprendizaje paramétrico

El aprendizaje paramétrico supone que se coloque la estructura (el grafo) de la red bayesiana y, en consecuencia, también la factorización de la probabilidad y qué probabilidades condicionadas forman la red.

El aprendizaje paramétrico consiste en encontrar los parámetros asociados a una estructura dada de una red bayesiana. Dichos parámetros son en las probabilidades a priori de los nodos raíz y las probabilidades condicionales de las demás variables dados sus padres. Si se conocen todas las variables es fácil obtener las probabilidades requeridas ya que 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.

Para definir completamente la red bayesiana y así representar la distribución de probabilidad conjunta, es necesario especificar para cada nodo  $X$  la distribución de probabilidad de  $X$  condicionada a los padres de  $X$ . La distribución de  $X$  condicionada a sus padres puede tener cualquier forma. Es usual trabajar con distribuciones discretas o gaussianas por simplicidad en los cálculos, pero a veces sólo se conocen restricciones en una distribución por lo que se puede utilizar el principio de entropía máxima para determinar la mayor entropía, dadas las restricciones. En el caso de las redes bayesianas dinámicas, lo más normal es especificar la distribución condicional de la evolución temporal del estado oculto para maximizar la velocidad de entropía del proceso estocástico implícito.

A menudo, estas distribuciones condicionales incluyen parámetros que son desconocidos y deben estimarse a partir de datos, utilizando el enfoque de máxima verosimilitud. La maximización directa de la probabilidad (o de la probabilidad posterior) suele ser compleja cuando hay variables no observadas. Una aproximación clásica a este problema es el algoritmo de la maximización de la expectativa que alterna el cómputo de los valores esperados de las variables no observadas, condicionadas a los datos observados, con la maximización de la probabilidad completa (o posterior), asumiendo que los valores esperados calculados previamente son correctos. Bajo condiciones de regularidad suave, este proceso converge en valores de máxima verosimilitud (o máximo posterior) para los parámetros.

Sin embargo, un enfoque más bayesiano de los parámetros es tratarlos como variables no observadas y calcular una distribución posterior completa sobre todos los nodos, condicionados a los datos observados, para luego integrar los parámetros. Este enfoque es más complejo y puede conducir a modelos de gran dimensión, por lo que en la práctica los enfoques clásicos de parametrización son más utilizados.

Por lo tanto, dada una estructura y las bases de datos, mediante el aprendizaje paramétrico se obtienen las probabilidades a priori y condicionales requeridas

## 2.2 Aprendizaje estructural

Mediante el aprendizaje estructural se obtiene la estructura de la red bayesiana a partir de bases de datos, es decir, se obtienen las relaciones de dependencia e independencia entre las variables involucradas. Las técnicas de aprendizaje estructural dependen del tipo de estructura y/o topología de la red (árboles, poliárboles o redes multiconectadas). Otra alternativa posible

es la combinación del conocimiento subjetivo de un experto, de forma que, partiendo de una estructura dada por el experto, esta se valida y mejora utilizando los datos estadísticos.

Los primeros algoritmos de aprendizaje estructural de redes bayesianas que surgieron se basan en un análisis de las relaciones de dependencia e independencia presentes en la distribución de probabilidad  $P$ : el problema consiste en encontrar un grafo dirigido acíclico (GDA) que sea un mapa de independencias (I-mapa) de  $P$ . En realidad, se busca un I-mapa mínimo; es decir, uno en el que hay dos grafos que sólo se diferencian en que hay un enlace que aparece en el primero pero no en el segundo y ambos son I-mapas de  $P$ . Es preferible el segundo, por los siguientes motivos:

- Porque muestra más relaciones de independencia que el primero, porque va a necesitar menos espacio de almacenamiento (alguna de las tablas será más pequeña)
- Porque va a ser más preciso (al necesitar menos parámetros podrá estimarlos con mayor fiabilidad, reduciendo además el riesgo de sobreajuste)
- Porque conducirá a una computación más eficiente.

Una vez obtenido el grafo, el aprendizaje paramétrico para hallar las probabilidades condicionadas y completar así la red bayesiana, se encuentra listo para llevarse a cabo.

Para describir una red bayesiana es necesario especificar dos cosas: la topología del gráfico (estructura) y los parámetros de cada distribución de probabilidad condicional (CPD). Es posible aprender de estos datos. Sin embargo, la estructura de aprendizaje es mucho más difícil que los parámetros de aprendizaje. Además, aprender cuando algunos de los nodos están ocultos, o faltan datos, es mucho más difícil que cuando se ha observado todo.

En muchos contextos prácticos la red bayesiana es desconocida y se necesita aprender de los datos. Este problema se conoce como el problema de aprendizaje de la red bayesiana, que se describe informalmente como: dados datos y la información previa (por ejemplo, el conocimiento de un experto o las relaciones casuales), estimar la topología del gráfico (estructura de red) y los parámetros del JPD (parámetros de probabilidad conjunta).

El aprendizaje estructural de la red bayesiana se considera más difícil que el aprendizaje paramétrico de la red. Por otra parte, otro hándicap surge en situaciones de observabilidad parcial cuando algunos nodos están ocultos o cuando faltan datos.

En el caso más simple, el caso más simple es cuando un experto determina la red bayesiana y luego la utiliza para realizar inferencia. En otras aplicaciones la tarea de definir la red es demasiado compleja para los seres humanos, de forma que la estructura de la red y los parámetros de las distribuciones locales deben aprenderse de los datos.

Para la construcción de la red se necesitan las variables que conformarán los nodos. En el presente estudio, las variables seleccionadas para la creación de la red bayesiana son las que se incluyen en la Tabla 1:

Tabla 1. Variables seleccionadas para la creación del modelo

Variable	Dimensión	Definición	Descripción
<b>AQED</b>	Ambiental	Calidad del aire	Principales focos de emisión del puerto que suponen emisiones significativas, evolución del número de quejas o denuncias registradas por la Autoridad Portuaria procedentes de grupos de interés relativas a emisiones de polvo o a la calidad del aire en general, medidas implantadas por la Autoridad Portuaria para controlar las emisiones ligadas a la actividad del conjunto del puerto
<b>BSED</b>	Económica	Negocio y servicios	Entre otros indicadores: ingresos por tasas de ocupación y actividad, uso comercial de la superficie, uso de los muelles, etc.
<b>EDID</b>	Institucional	Papel del sector portuario como dinamizador de la actividad productiva	Principales sectores o actividades relevantes en el desarrollo económico local que se apoyan en el puerto para su desarrollo
<b>EIED</b>	Ambiental	Comunidad portuaria	Condiciones o exigencias sobre aspectos ambientales en los pliegos de prescripciones técnicas particulares de los servicios portuarios, en términos de otorgamiento y en títulos de concesión o autorización
<b>ETSD</b>	Social	Capital humano de la actividad portuaria	Empleo, comunicación interna y participación, formación, estructura de plantilla y equidad, seguridad y salud en el trabajo, etc.
<b>FSED</b>	Económica	Situación económica financiera	Entre otros indicadores: rentabilidad sobre activos, EBIDTA/tonelada, servicio de la deuda, relación gastos de explotación e ingresos de explotación, etc.
<b>IEID</b>	Institucional	Calidad en la prestación de los servicios	Iniciativas promovidas por la Autoridad Portuaria dirigidas a mejorar la eficiencia, la calidad del servicio y el rendimiento de los servicios prestados a la mercancía

Variable	Dimensión	Definición	Descripción
<b>MSED</b>	Ambiental	Gestión ambiental	Grados de implantación de los sistemas de gestión ambiental (EMAS, ISO 14001 y PERLS) y recursos económicos invertidos, gastos, así como inversiones en su caso, asociados a la implantación, certificación y mantenimiento de un sistema de gestión ambiental
<b>MSID</b>	Institucional	Herramientas de apoyo a la gestión	Sistemas de gestión de apoyo a la toma de decisiones: sistemas de gestión de la calidad, cuadros de mando integral, campañas de caracterización de mercados, etc.
<b>PCSD</b>	Social	Empleo y seguridad laboral en la comunidad portuaria	Empleo en la comunidad portuaria, seguridad laboral y formación en servicios y concesiones portuarios, etc.
<b>PIID</b>	Institucional	Presencia de la iniciativa privada	Número de empresas que operan en el puerto, superficie terrestre ocupada, caracterizada como uso comercial concesionado, etc.
<b>PSID</b>	Institucional	Transparencia y libre competencia	Iniciativas dirigidas a garantizar que todo operador que desee prestar servicios en el puerto u optar a una concesión pueda conocer de modo transparente las condiciones para operar en el puerto y los mecanismos administrativos que regulan dicho proceso
<b>RIID</b>	Institucional	Generación de infraestructura portuaria	Papel de la Autoridad Portuaria como proveedor de la infraestructura
<b>RMED</b>	Ambiental	Gestión de residuos	Residuos generados por la Autoridad Portuaria que son segregados y valorizados, actividades o fuentes de generación de residuos dentro del puerto, iniciativas promovidas por la Autoridad Portuaria para la mejora de la gestión de residuos de la comunidad portuaria
<b>SIED</b>	Económica	Nivel y estructura de las inversiones	Entre otros indicadores: inversión pública en relación con el cash-flow,

Variable	Dimensión	Definición	Descripción
			inversión ajena frente a la inversión pública, renovación de activos
<b>SQED</b>	Ambiental	Calidad acústica	Principales focos de emisión (puntuales y difusos) del puerto que suponen emisiones acústicas significativas, evolución del número de quejas o denuncias registradas por la Autoridad Portuaria procedentes de grupos de interés, elaboración de mapa de ruido y plan de acción acústica
<b>STID</b>	Institucional	Mercados servidos	Estructura y evolución de los principales tráficos de mercancías
<b>TRID</b>	Institucional	Servicios y concesiones/autorizaciones	Tipos, marco de prestación y regulación
<b>TSID</b>	Institucional	Integración de los puertos en el sistema de transporte	Eficiencias con la que son coordinados los diferentes modos de transporte que confluyen en el puerto
<b>VPED</b>	Económica	Valor generado y productividad	Entre otros indicadores: productividad del trabajo según ingresos, productividad del trabajo según EBIDTA, etc.
<b>WEED</b>	Ambiental	Ecoeficiencia	Eficiencia en el uso del suelo, consumo de agua y energía eléctrica por la Autoridad Portuaria
<b>WQED</b>	Ambiental	Calidad del agua	Principales focos de vertido situados en el puerto que tienen un impacto significativo en la calidad del agua y sedimentos de las dársenas del puerto, medidas implantadas por la Autoridad Portuaria para controlar las emisiones ligadas a la actividad del conjunto del puerto, superficie de la zona de servicio que cuenta con recogida y tratamiento de aguas residuales

Aprender la estructura gráfica de una red bayesiana es un desafío que se persigue dentro del aprendizaje automático. La red obtenida a partir de las variables anteriores como se muestra en la Figura 3, habiéndose obtenido empleando el algoritmo K2.

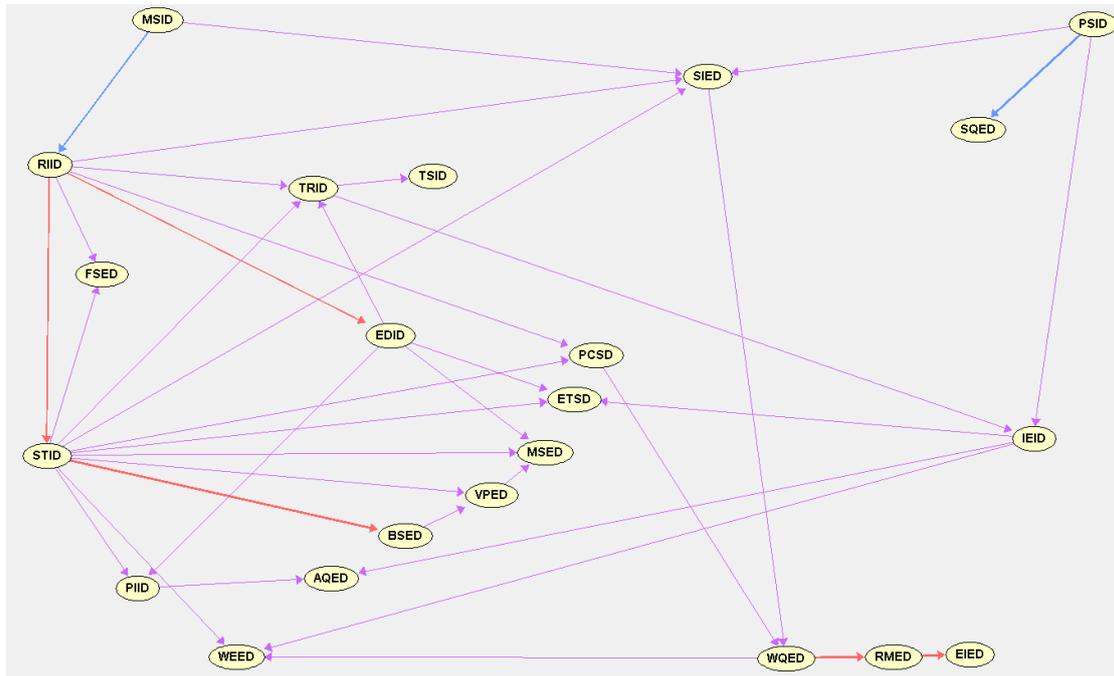


Figura 3. Representación gráfica de la red bayesiana obtenida al aplicar el algoritmo K2 a las variables seleccionadas

### 2.3 Diagrama de influencia o redes de decisión

Aunque las redes bayesianas se utilizan para tomar decisiones, los conceptos de utilidad y las decisiones no se modelan explícitamente. La teoría de la utilidad vinculada a las redes bayesianas proporciona un marco para la toma de decisiones llamadas diagramas de influencia o redes de decisión [10].

Los diagramas de influencia extienden las redes bayesianas usando dos nuevos tipos de nodos:

- Nodos de utilidad (o valor) que representan la utilidad y cuantifican las preferencias de decisión (generalmente en términos monetarios)
- Nodos de decisión. Los valores de estos nodos contienen acciones que la persona encargada de tomar la decisión puede utilizar (en el presente estudio, dicha persona es el administrador del proyecto).

Además de estos dos tipos, en las redes bayesianas existe el nodo circular u oval que se denomina nodo aleatorio (Figura 3).

La red da una idea aproximada de la información numérica contenida. Esto hace que cada enlace se muestre con su propio color y ancho. En pocas palabras, los enlaces coloreados en rojo indican que hay una influencia positiva, es decir, un aumento del valor del nodo padre aumenta el valor del nodo hijo. Los enlaces azules indican influencia negativa. Los enlaces negros indican que no se transmite información y los enlaces violetas indican que hay influencia ambigua, es decir, hay influencia positiva para ciertos valores paternos e influencia negativa para otros. Cuanto mayor sea la influencia de un nodo en otro, mayor anchura tiene el enlace. Al interpretar los enlaces de red y los colores de cada uno, se deben tener en cuenta los estados de cada variable.

Por lo tanto, de la Figura 3 se desprende que la función de la Autoridad Portuaria como generadora de infraestructuras portuarias tiene una influencia positiva en la estructura y evolución de los principales tráficos y en las actividades relevantes en el desarrollo económico local. Por el ancho de enlace se observa que la influencia es mucho mayor en la estructura y en la evolución de los principales tráficos de mercancías. Es decir, si la Autoridad Portuaria proporciona suelo portuario para operar, el tráfico y las actividades en el entorno aumentarán, de forma que el aumento del tráfico portuario supondrá a la vez un aumento de los ingresos por tasas de ocupación y actividad, uso comercial de la superficie y uso de los muelles.

Las relaciones azules relativos a influencias negativas, de forma que cuanto mayor sean los sistemas de gestión de apoyo a la toma de decisiones, que corresponden a sistemas de gestión de la calidad, cuadros de mando integral, campañas de caracterización de mercados, entre otros, menor deberá ser el papel de la Autoridad Portuaria como proveedor de infraestructura, la cual será provista por privados.

De igual modo, al ser un enlace azul el que une ambos nodos, el número de principales focos de emisión del puerto que suponen emisiones acústicas significativas, así como la evolución del número de quejas o denuncias registradas por la Autoridad Portuaria procedentes de grupos de interés, elaboración de mapa de ruido y el plan de acción acústica, aumentan cuando disminuyen las iniciativas dirigidas a garantizar que todo operador que desee prestar servicios en el puerto u optar a una concesión pueda conocer de modo transparente las condiciones para operar en el puerto y los mecanismos administrativos que regulan dicho proceso.

### 3. Conclusiones

Con la construcción de una red bayesiana se pueden conocer las relaciones entre las diferentes variables de sostenibilidad portuaria, usando para ello el algoritmo K2. De dicha red se desprende que la categoría más decisiva es la categoría institucional, a la que siguen, a un mismo nivel la categoría económica y la social, finalizando con la categoría ambiental.

Por otro lado, la red muestra que las variables institucionales están interconectadas entre sí, mientras que las variables económicas son importantes como causa-efecto porque son efectos de la variable STID (mercados servidos) que pertenecen a la dimensión institucional. Así, por el valor generado y la productividad dependen del tipo de negocio y de servicio (ocupación y actividad de los ingresos por comisiones, uso comercial de la superficie, uso de muelles, etc.).

Las variables sociales son efectos de variables institucionales pero no tienen una relación directa con su misma dimensión. Así, se observa que las variables ambientales están estrechamente interconectadas con la dimensión social y, fundamentalmente son efectos de la categoría institucional.

Finalmente, a modo de conclusión, dado que las variables económicas, sociales y ambientales son efectos de las institucionales, se determina que la cuestión clave es que las Autoridades Portuarias deben comenzar a incorporar elementos sostenibles en las herramientas usadas para regular los servicios portuarios y la gestión, tal y como se estipula en la legislación vigente, si bien, como se ha comentado, existe una fuerte limitación metodológica que hace que la aplicación práctica de la sostenibilidad no resulte fácil.

## Referencias

- [1] CASTILLO, Enrique, GUTIÉRREZ, Jose María and HADI, Ali S. *“Expert Systems and Probabilistic Network Models”*, Springer Verlag, 1997
- [2] CRESPO, Patricio. *“Marco Conceptual Introductorio. Agenda Ecuatoriana de Educación y Comunicación Ambiental para el Desarrollo Sustentable - Lineamientos de Políticas y Estrategias”*, Quito, 1994
- [3] CRESPO SOLER, Cristina, GINER FILLOL, Arturo, MORALES BARAZA, José Antonio., PONTE TUBAL, Nicolás., RIPOLL FELIU, Vicente *“La información de sostenibilidad en el marco de las cuentas anuales: análisis aplicado al caso de la Autoridad Portuaria de Valencia”*, Revista do Contabilizado de Maestrado em Ciências Contábeis da UERJ, Rio Janeiro, v-12, n.3, p-11 set./dez, 2007
- [4] DE VALENCIA, Autoridad Portuaria *“Análisis de indicadores económicos en las memorias de sostenibilidad: el caso del Sistema Portuario español”*, Consejo Editorial.
- [5] DOMÉNECH, Juan Luis *“Huella ecológica portuaria y desarrollo sostenible”*, Puertos, vol. 114, pp. 26-31, 2004
- [6] DOERR, Octavio *“Políticas portuarias sostenibles”*, Boletín FAL. CEPAL. Edición nº 299, número 7 de 2011
- [7] DUDA, Richard O.; HART, Peter. E. and STORK, David. G. *“Pattern Classification”*, NY Wiley, 2000
- [8] GLOBAL REPORTING INITIATIVE *“Guía para la elaboración de Memorias de Sostenibilidad”*, Versión 3.1. GRI, 2000
- [9] GONZÁLEZ LAXE, Fernando, GUERRA SIERRA, Andrés, MARTÍN PALMERO, Federico, NÓVOA GÓMEZ, Juan José., OTERO COUTO, Carlos y PENELA NÚÑEZ, Jorge *“Medición de la sostenibilidad en el Sistema Portuario Español: Propuesta metodológica a través de indicadores sintéticos de desarrollo sostenible”*, XII Reunión de economía mundial, Santiago de Compostela, mayo de 2010.
- [10] JENSEN, Finn V. *“An Introduction to Bayesian Networks”*, London, UCL Press. 1996
- [11] LI, Xuefei, CAMARERO ORIVE, Alberto, SOLER FLORES, Francisco y GONZÁLEZ CANCELAS, Nicoleta *“NNtex: A toolbox to use the Neuronal Network in an easy way”* Pensamiento Matemático, ISSN 2174-0410, Vol. III, Nº. 1 (Octubre), pp. 149-154, 2012
- [12] MADERO GÓMEZ, Sergio Manuel; ZARATE SOLÍS, Itzel Alejandra *“La sostenibilidad desde una perspectiva de las áreas de negocios”* Cuadernos de Administración, vol. 32, no 56, p. 7-19, 2017
- [13] MARBAN FLORES, Raquel *“La Agenda 21 impulsora del desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente en Europa y en España”* Boletín económico del ICE Nº 2899, pp. 31-45, 2006
- [14] MÉNDEZ, Néstor Darío, DUQUE PORRAS, Julio César, CHAVARRO LAVERDE, Ricardo Moreno *“Seguridad inteligente”* Scientia et technica, vol. 3, no 35, p. 389-394, 2007
- [15] MOLINA SERRANO, Beatriz, GONZÁLEZ CANCELAS, Nicoleta, SOLER FLORES, Francisco y CAMARERO ORIVE, Alberto *“Classification and prediction of port variables using Bayesian Networks”* Congresos de la Universitat Politècnica de València, CIT2016. Congreso de

Ingeniería del Transporte. 2016.

- [16] PEARL, Judea “*The Solution for the Branching Factor of the Alpha-Beta Pruning Algorithm and its Optimality*” *Communications of the ACM*, 1982, vol. 25, no. 8. pp. 559-564.
- [17] PUERTOS DEL ESTADO. “*Memoria de sostenibilidad del sistema portuario de interés general*”, 2011
- [18] QUIJADA-ALARCÓN, Jorge, GONZÁLEZ CANCELAS, Nicoleta, SOLER FLORES, Francisco José y CAMARERO ORIVE, Alberto “*Use of decision trees algorithm for the territorial logistic planning*” *Revista Pensamiento Matemático*, ISSN 2174-0410, Vol. III, Nº. 2 (Octubre) pp. 051-058, 2013
- [19] RODRÍGUEZ GARCÍA, Tomás, GONZÁLEZ CANCELAS, Nicoleta y SOLER FLORES, Francisco “*Previsiones de crecimiento y necesidades de infraestructura en terminales portuarias mediante redes neuronales artificiales*” *Pensamiento Matemático*, ISSN 2174-0410, Vol. V, Nº. 2 (Octubre), pp. 087-108, 2015
- [20] SÁNCHEZ, RICARDO, JAIMURZINA, Azhar, WILMSMEIER, Gordon, PÉREZ-SALAS, Gabriel, DOERR, Octavio, PINTO, Francisca “*Transporte marítimo y Puertos. Desafío y oportunidades en busca de un desarrollo sostenible de América Latina y El Caribe*” CEPAL. Serie Recursos Naturales e Infraestructura, 2015
- [21] SARRO, Lucía Andrea “*Hacia una memoria de sostenibilidad del puerto de Bahía Blanca: diagnóstico para su posible implementación*” Tesis doctoral, <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2868>, 2016
- [22] SERRANO, Óscar “*Operativa portuaria y sostenibilidad*”. CONAMA LOCAL 2015, Málaga, 7 octubre de 2015.
- [23] SIMON, Herbert A. “*Why should machines learn?*” *Machine Learning*, Michalski et al. (eds.) Palo Alto CA: Tioga, 1983
- [24] SOLER, Francisco y OLIVAS, José Ángel “*Estimación de sucesos raros mediante Redes Bayesianas*” *Pensamiento Matemático*, ISSN 2174-0410, Vol. IV, Nº. 1 (Abril), pp. 127-136, 2014
- [25] SOLER, Francisco, OLIVAS, José Ángel. y LÓPEZ, María Dolores “*Sucesos raros en Ingeniería de Tráfico*” *Pensamiento Matemático*, ISSN 2174-0410, Vol. V, Nº. 1 (Abril), pp. 063-074, 2015
- [26] WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED) “*Our Common Future (Brundtland Report)*”, United Nations, 1987

### **Sobre los autores:**

*Nombre:* Beatriz Molina Serrano

*Correo Electrónico:* bmolina@prointec.es

*Institución:* Universidad Politécnica de Madrid, España.

*Nombre:* Nicoleta González Cancelas

*Correo Electrónico:* nicoleta.gcancelas@upm.es

*Institución:* Universidad Politécnica de Madrid, España.

*Nombre:* Francisco Soler Flores

*Correo Electrónico:* f.soler@upm.es

*Institución:* Universidad Politécnica de Madrid, España.

*Nombre:* Alberto Camarero Orive

*Correo Electrónico:* alberto.camarero@upm.es

*Institución:* Universidad Politécnica de Madrid, España.

*Nombre:* Alfonso Camarero Orive

*Correo Electrónico:* alcamor@gmail.com

*Institución:* Universidad Politécnica de Madrid, España.