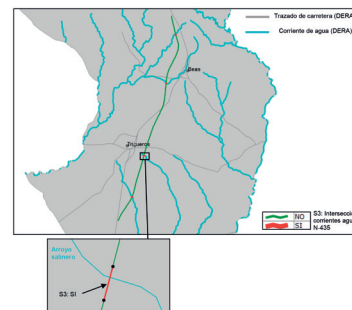


# Vulnerabilidad de las infraestructuras frente a eventos climáticos. Inundación de carreteras

## Vulnerability of infrastructures to climate events. Road flooding



Nerea Tárrago-Garay<sup>1</sup>, Francisco-Javier Royo-Abancéns<sup>2</sup> y Ignacio Torreira-de-la-Hera<sup>3</sup>

<sup>1</sup> TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA). Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia. C/Geldo, Edificio 700 – 48160 Derio, Vizcaya (España).

<sup>2</sup> Ferrovial. C/ Ribera del Loira, 42 – 28042 Madrid (España).

<sup>3</sup> Azvi. C/ Almendralejo, 5 – 41019 Sevilla (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9650> | Recibido: 23/01/2020 • Inicio Evaluación: 23/01/2020 • Aceptado: 18/03/2020

### ABSTRACT

- The present study defines an original methodology for diagnosing the vulnerability of infrastructure to climatic events. Against existing approaches, this methodology increases the objectivity in the assessment and weighting of the aspects involved in a multicriteria procedure. In addition, it includes the automation and digitalization of the process.

For this purpose, concepts extracted from the MIVES methodology (Integrated Value Model for Sustainable Evaluation) are used, especially the Hierarchical Analytical Procedure, combined with the GIS (Geographical Information System) support of infrastructure and its environment information (geo-referenced spatial information with semantic information associated). The procedure has been particularized for the case of road flooding. For its validation and optimization, it has been applied on two real cases: the A-92 between Seville and Almería and the variant to the N-435 between the towns of Beas and Trigueros. With all this, a procedure has been defined and validated to obtain a unique measurement / comparison index of the degree of vulnerability to flooding of the different units of analysis or sections into which the road infrastructure is previously divided.

- **Key Words:** road, climate, vulnerability, multi-criteria analysis, GIS.

### RESUMEN

El presente estudio define una metodología original para el diagnóstico de la vulnerabilidad de las infraestructuras ante eventos climáticos.

Frente a aproximaciones existentes, esta metodología aumenta la objetividad en la valoración y ponderación de los aspectos implicados en un procedimiento multicriterio. Además, añade la automatización y digitalización del proceso.

Para ello se emplean conceptos extraídos de la metodología MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible), especialmente el Procedimiento Analítico Jerárquico, combinados con el soporte GIS (Geographical Information System) de la información de la infraestructura y su entorno (información espacial geo-referenciada con información semántica asociada).

El procedimiento se ha particularizado para el caso de inundación de carreteras. Para su validación y optimización, la metodología se ha aplicado sobre dos casos reales: la A-92 entre Sevilla y Almería y la variante a la N-435 entre las poblaciones de Beas y Trigueros.

Con todo ello se ha definido y validado un procedimiento para la obtención de un índice único de medición/comparación del grado de vulnerabilidad a inundación de las diferentes unidades de análisis o tramos en que previamente se divide la infraestructura vial.

**Palabras Clave:** carretera, clima, vulnerabilidad, análisis multicriterio, GIS.

### 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existen evidencias de una tendencia a la modificación del clima en la Tierra. Aunque es muy difícil discernir exactamente qué parte de esta modificación tiene causas antropogénicas y qué parte se debe a las modificaciones climáticas que han existido a lo largo de toda la historia del planeta, es evidente una tendencia actual al calentamiento agravada por la actividad humana.

Las modificaciones en las variables climáticas (especialmente la mayor severidad y frecuencia de eventos meteorológicos extremos), que se espera se produzcan en los próximos años, impondrán nuevos requerimientos a los sistemas de diferentes sectores para que estos puedan mantener su funcionalidad y servicio a la sociedad. El sector de las infraestructuras de transporte será uno de los sectores más afectados, siendo la adaptación o el aumento de la resiliencia de dichas infraestructuras ante eventos extremos un gran reto actual y futuro.

Muchos países han adoptado ya políticas o medidas para la mitigación del cambio climático (para frenar o reducir el cambio en sí mismo), como la reducción de gases de efecto invernadero de sus sistemas de transporte. Por el contrario, la adaptación de esos mismos sistemas de transporte a los efectos inevitables de dicho cambio se encuentra en un estadio mucho más inicial [1] [2].

Uno de los aspectos que dificulta que las entidades implicadas aborden la adaptación de sus sistemas de transporte, es la dificultad para fomentar la asignación de partidas presupuestarias a este efecto cuando desconocen la vulnerabilidad real de su red y componentes.

La **vulnerabilidad de un sistema frente al cambio climático** es el grado en que dicho sistema es susceptible, o incapaz de hacer frente, a los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los extremos (International Panel of Climate Change - IPCC, 2007) [3].

La capacidad para la detección de los elementos/tramos vulnerables, incluyendo el grado y causas de dicha vulnerabilidad, per-

mitiría a las entidades implicadas la priorización y optimización del planteamiento de las medidas de adaptación.

Entidades como la estadounidense Federal Highway Administration (FHWA) han detectado también esta problemática, participando en la definición del marco de trabajo para su resolución [4].

En los últimos años se han realizado avances a nivel internacional en este campo, con desarrollos orientados al establecimiento de metodologías de diagnóstico de la vulnerabilidad de la red de transporte. Destacan los avances en el tratamiento del sistema como red, y no como elementos aislados, dando especial importancia a la accesibilidad y la capacidad de evacuación y prestación de socorro en caso de afección [5] [6] [7]. En la línea del presente estudio, existen propuestas de índices integrados o únicos para medir la vulnerabilidad [8] [9] [10].

Algunos de los desarrollos existentes se centran en la posible afección en la ubicación en que se encuentra un determinado tramo de la red (sin introducir aspectos específicos de la propia configuración de la carretera), otros priorizan la gestión de la emergencia, otros los posibles avances en la predicción climática.

No existe a día de hoy una metodología que, incluyendo criterios tanto del entorno/ubicación, como de la propia configuración de la carretera como, por supuesto, de la climatología/meteorología habitual y esperada en el futuro, sea capaz de emitir un diagnóstico objetivo en el que se introduzca la variable de la importancia que se da a cada uno de los criterios tenidos en cuenta.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para dar respuesta a la identificada necesidad de determinación de la vulnerabilidad de las infraestructuras a eventos climáticos, se ha diseñado una metodología original para la determinación de la vulnerabilidad de una infraestructura lineal frente a un determinado efecto del cambio climático. Como primera aproximación, se ha particularizado para el caso de inundación de la calzada de infraestructura vial (transporte por carretera).

El enfoque de la metodología desarrollada traslada varios conceptos de la metodología MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible) [11][12] persiguiendo la objetividad del proceso de toma de decisión.

MIVES define un procedimiento genérico para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas constructivos que ha sido desarrollado por investigadores de la Universidad Politécnica de Cataluña, de la Universidad del País Vasco, de la Universidad de La Coruña y del centro tecnológico Tecnalia. El método se creó en 2005, fecha de conclusión del Plan Nacional MIVES (MAT2002-04310-C03), posteriormente destaca su empleo como metodología base para el desarrollo del Anejo 13 de Sostenibilidad de la Instrucción de Hormigón Estructural – EHE [13] y del Anejo 11 de la Instrucción de Acero Estructural – EAE [14]. Si bien inicialmente MIVES estaba orientado principalmente a la evaluación cuantitativa de aspectos relacionados con la sostenibilidad, su versatilidad la hace útil para aplicarla en un infinito abanico de campos de conocimiento [15][16]. En la página web de la Universidad de Cataluña (Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental) se ofrecen detalles de la metodología e incluso software generado para su aplicación [17].

El análisis de vulnerabilidad desarrollado se plantea como la determinación de un índice único de vulnerabilidad para cada uno de los tramos en los que se divide previamente la infraestructura lineal, de modo que mediante una escala única de medición/comparación puedan detectarse los tramos más vulnerables a un determinado evento climático.

La figura siguiente muestra la posible visualización del índice de vulnerabilidad sobre el mapa de trazado de una carretera, que con una coloración tipo semáforo permite percibir de forma rápida e intuitiva los tramos más y menos vulnerables.



Fig. 1: Visualización tipo de resultados de vulnerabilidad

### 2.1. PANEL DE INDICADORES

El índice de vulnerabilidad se obtiene a partir del valor que se le asigna previamente a una serie de indicadores o parámetros seleccionados por considerarse claves en el comportamiento/respuesta de la infraestructura y que conformarán el que pasa a denominarse PANEL DE INDICADORES DE VULNERABILIDAD.

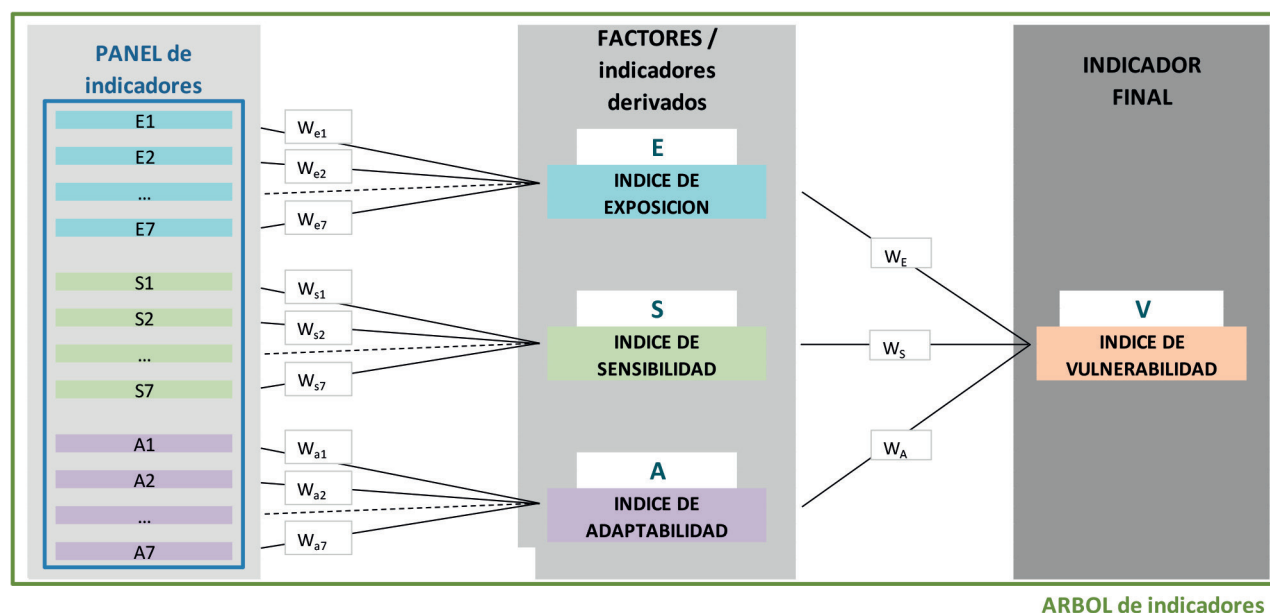
De acuerdo con el IPCC (International Panel of Climate Change) [3] la vulnerabilidad es función del carácter, magnitud y ritmo de variación climática al que un sistema está expuesto, su sensibilidad y su capacidad de adaptación. Siguiendo este criterio, el panel de indicadores de vulnerabilidad propuesto se estructura en los siguientes tres grandes bloques o factores:

- **EXPOSICIÓN** de la Infraestructura: Situación de una infraestructura en una zona en la que se producirá un determinado evento.
- **SENSIBILIDAD** de la Infraestructura: Propensión o potencialidad de una infraestructura a verse afectada o sufrir alteraciones en caso de verse expuesta a un evento.
- **ADAPTABILIDAD** de la Infraestructura: Capacidad de una infraestructura de ajustarse satisfactoriamente a los cambios consecuencia del evento, moderando los daños potenciales, aprovechando las consecuencias positivas o soportando las consecuencias negativas.

El análisis de los aspectos clave, de cada uno de los tres factores anteriores, en el posible efecto de una inundación sobre la infraestructura vial se traduce en la generación de un panel con 21 indicadores (7 por bloque). Este análisis ha incluido tanto la revisión del estado del arte en la materia (road flooding KPIs – key performance indicators) como la consulta a técnicos especializados en la gestión de inundación de carreteras. La simplificación a 7 indicadores por bloque da respuesta a la premisa de que para que una metodología sea aplicable y pueda introducirse en el campo de la gestión de infraestructuras deben evitarse procedimientos complejos o excesivamente laboriosos.

- **INDICADORES DE EXPOSICIÓN:** Los tramos de carretera situados en zonas inundables (especialmente en los casos de periodos de retorno más reducidos), con una distribución de la precipitación más concentrada en episodios puntuales de lluvia intensa o en las que se prevea un aumento de la cantidad de precipitación en años futuros, tendrán más probabilidades de verse expuestos a inundaciones. Con base en estos criterios, se generan 7 indicadores de exposición con los identificadores E1 a E7. A continuación se incluye la definición exacta de cada uno de ellos.

- E1: Zona de muy alta probabilidad de inundación (inundable a 10 años).
- E2: Zona de alta probabilidad de inundación (inundable a 50 años).
- E3: Zona de probabilidad media-baja de inundación (inundable a 100-500 años).



ARBOL de indicadores

Fig. 2: Esquema del árbol de indicadores de vulnerabilidad

E4: Precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 100.

E5: Torrencialidad de las precipitaciones.

E6: Variación esperada en la precipitación media anual a corto plazo (hasta 2040).

E7: Variación esperada en la precipitación media anual a medio plazo (periodo 2041 – 2070).

- INDICADORES DE SENSIBILIDAD: Los tramos de carretera que ya hayan sufrido daños en el pasado, deprimidos respecto a los terrenos colindantes, que intersectan corrientes de agua, ubicados en zonas de terrenos impermeables, muy urbanizadas, con niveles freáticos elevados o próximos a la costa, tienen más probabilidades de verse afectados en caso de producirse inundaciones en la zona en la que se ubican. Con base en estos criterios, se generan 7 indicadores de sensibilidad con los identificadores S1 a S7. A continuación se incluye la definición exacta de cada uno de ellos.

S1: Daños sufridos en el pasado relacionados con las precipitaciones.

S2: Elevación del tramo respecto a terrenos colindantes.

S3: Presencia o intersección de corrientes de agua.

S4: Permeabilidad del terreno en las proximidades de la carretera.

S5: Nivel de urbanización en las proximidades de la carretera.

S6: Nivel freático (distancia de la superficie del terreno a la capa freática).

S7: Distancia a la línea de costa.

- INDICADORES DE ADAPTABILIDAD: Los tramos de carretera de mayor categoría, que soportan mayor tráfico, que forman vías de evacuación de la población en caso de emergencia (acceso a puertos o aeropuertos) o accesos a áreas críticas (hospitales, policía, bomberos), cuyas vías alternativas implican grandes longitudes extra o cuyos costes de reemplazo o históricos de reparación son elevados, tienen más probabilidades de causar consecuencias importantes en caso de verse expuestos y afectados por una inundación. Con base en estos criterios, se generan 7 indicadores de adaptabilidad con los identificadores A1 a A7. A continuación se incluye la definición exacta de cada uno de ellos.

A1: Categoría de la carretera.

A2: Tráfico diario medio.

A3: Distancia a nodos de evacuación de la población (puertos o aeropuertos).

A4: Distancia a áreas críticas (hospitales, parques de bomberos o comisarías de policía).

A5: Longitud extra de la desviación / ruta alternativa (km).

A6: Coste de reemplazo de la infraestructura en caso de colapso.

A7: Datos históricos de costes de reparación (€).

## 2.2. ÁRBOL DE INDICADORES

El procedimiento para pasar de los valores que se asigna a un conjunto de indicadores a un valor único del índice de vulnerabilidad (para cada uno de los tramos en que se divide la infraestructura lineal) se resume en una sumatoria ponderada en varios tramos que da lugar al ARBOL DE INDICADORES DE VULNERABILIDAD.

Definidos estructura y contenidos del PANEL DE INDICADORES, se exponen a continuación los pasos para llegar al ÍNDICE DE VULNERABILIDAD desarrollando el ÁRBOL DE INDICADORES:

- 1) VALORACIÓN de indicadores iniciales: La valoración consiste en la asignación de un valor a cada uno de los indicadores del panel (E1-E7, S1-S7, A1-A7) para cada uno de los tramos analizados.

Para facilitar la usabilidad de la metodología y garantizar que los resultados de su aplicación son comparables, las opciones de valoración no son abiertas, sino que se establecen un número de opciones cerradas de posibles valoraciones para cada uno de los indicadores. Dichas opciones pueden ser de carácter cualitativo o cuantitativo por tramos en función del indicador.

Por ejemplo, para el caso del indicador A1 (tipo de carretera) el valor será cualitativo (Local Comarcal / Nacional / Autopista-Autovía) y para el caso del indicador A2 (Tráfico diario medio) el valor será cuantitativo por tramos (< 5.000 / 5.000 – 15.000 / 15.000 – 30.000 / > 30.000 vehic./ día).

- 2) PUNTUACIÓN de indicadores iniciales: La puntuación consiste en transformar la valoración del apartado anterior en una puntuación numérica.

Para ello se adoptan los siguientes criterios:

- El rango de puntuación considerado va de 0 a 10.
- Los posibles valores están ordenados de los que se aso-

- cian a una vulnerabilidad menor de la infraestructura a los que se asocian a una vulnerabilidad mayor.
- 3) **PONDERACIÓN** de indicadores iniciales: Para introducir la consideración de la importancia o impacto que tiene cada uno de los siete indicadores en el factor al que corresponde, se introduce en el análisis el concepto del peso que se asigna a cada uno de ellos dentro del bloque ( $w_{e1}$ - $w_{e7}$ ,  $w_{s1}$ - $w_{s7}$ ,  $w_{a1}$ - $w_{a7}$ ).
- El procedimiento de asignación de pesos se basa en el Proceso Analítico Jerárquico desarrollado por Thomas L. Saaty (1980) [18][19] para resolver problemas complejos de criterios múltiples. Partiendo de una matriz en la que se establecen las importancias relativas entre indicadores por pares de forma cualitativa, se obtiene el vector de pesos cuantitativos de cada uno de los elementos considerados dentro del conjunto. El procedimiento incluye el cálculo del ratio de consistencia, cuyo valor es preciso controlar para garantizar la consistencia del juicio emitido en esta valoración multicriterio.
- La asignación de las importancias relativas por pares de forma cualitativa ha sido ejecutada por un panel de expertos compuesto por técnicos de las empresas participantes, su transformación en pesos cuantitativos con la consistencia requerida es un proceso matemático que se ha automatizado.
- La parte automatizada incluye el paso de la matriz de una escala verbal o cualitativa a una escala numérica o cuantitativa asegurando la reciprocidad ( $a_{ji} = 1/a_{ij}$ ) y homogeneidad ( $a_{ii} = 1$ ), la normalización de la matriz, la obtención del vector propio o vector de pesos y el cálculo del ratio de consistencia.
- Este procedimiento se ejecuta tres veces:
- Con la matriz de importancias relativas de los indicadores de exposición E1 a E7 se obtiene el vector propio o vector de pesos  $w_{e1}$ - $w_{e7}$ .
  - Con la matriz de importancias relativas de los indicadores de sensibilidad S1 a S7 se obtiene el vector propio o vector de pesos  $w_{s1}$ - $w_{s7}$ .
  - Con la matriz de importancias relativas de los indicadores de adaptabilidad A1 a A7 se obtiene el vector propio o vector de pesos  $w_{a1}$ - $w_{a7}$ .
- 4) **CÁLCULO** de indicadores derivados (índices de EXPOSICIÓN,

SENSIBILIDAD y ADAPTABILIDAD): Los indicadores derivados o índices de exposición, sensibilidad y adaptabilidad, se calculan como una sumatoria de los indicadores ponderados correspondientes a cada uno de dichos bloques (para cada uno de los elementos analizados). Es decir, para cada elemento (o tramo de carretera):

$$E = \sum_{i=1}^7 E_i \cdot w_{e_i} \tag{1}$$

$$S = \sum_{i=1}^7 S_i \cdot w_{s_i} \tag{2}$$

$$A = \sum_{i=1}^7 A_i \cdot w_{a_i} \tag{3}$$

- 5) **PONDERACIÓN** de indicadores derivados: Para introducir la consideración de la importancia o impacto que tiene cada uno de los tres factores en el índice final de vulnerabilidad, se introduce igualmente en el análisis el concepto del peso que se asigna a cada uno de los tres ( $w_E$ ,  $w_S$ ,  $w_A$ ).

El procedimiento de asignación de pesos se basa en un Proceso Analítico Jerárquico que se ejecuta de forma similar a la ponderación de los siete indicadores dentro de cada bloque.

- 6) **CÁLCULO** de indicador final (índice de VULNERABILIDAD): El indicador final o índice de vulnerabilidad, se calcula como una sumatoria de los indicadores ponderados correspondientes a cada uno de los tres factores (para cada uno de los elementos analizados). Es decir, para cada elemento (o tramo de carretera):

$$V = E \cdot w_E + S \cdot w_S + A \cdot w_A \tag{4}$$

La figura (3) resume el procedimiento descrito.

3. RESULTADOS

La nueva metodología desarrollada, expuesta en el apartado anterior, se ha aplicado como ejercicio de verificación y optimización en dos casos reales (ambos en la comunidad autónoma de Andalucía):

| VALORACIÓN INDICADOR | No Aplicable | valor asociado a una vulnerabilidad baja | valor asociado a una vulnerabilidad media | valor asociado a una vulnerabilidad alta | valor asociado a una vulnerabilidad muy alta |
|----------------------|--------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|
| PUNTUACIÓN INDICADOR | 0            | 1                                        | 4                                         | 7                                        | 10                                           |

Tabla 1: Relaciones de transformación valoración-puntuación

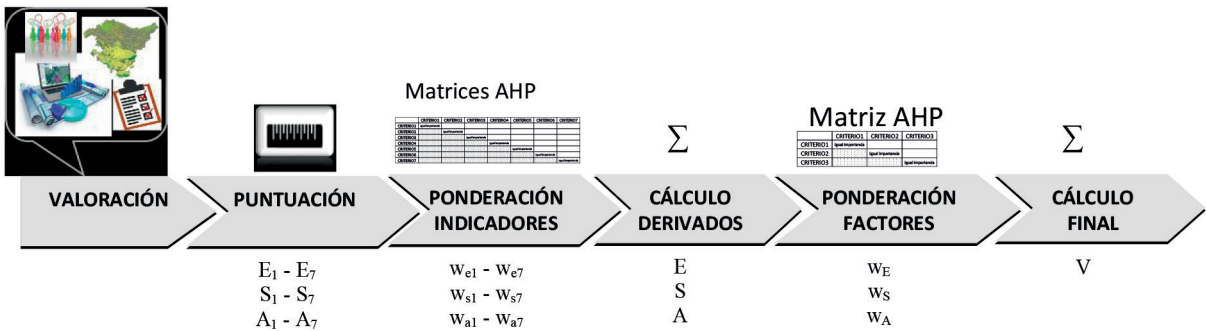


Fig. 3: Esquema del procedimiento de obtención del índice de vulnerabilidad

- la carretera A-92 entre Sevilla y Almería, en conservación y mantenimiento por la empresa AZVI, S.A.U. entre los puntos kilométricos 49,770 y 127,260,
- y la variante entre las poblaciones Beas y Trigueros a la N-435 (Huelva), carretera en construcción por la empresa FERROVIAL.

A continuación, se amplía el detalle de cada uno de los dos casos anteriores junto con los criterios para su selección:

- La A-92 discurre entre Sevilla y Almería, por Granada. Es una autovía con dos calzadas separadas por una mediana, con dos carriles por sentido de circulación, con arcenes exteriores superiores a 2 metros e interiores de 0,50 metros. A ambos lados se encuentran los caminos de servicio, normalmente en tierra, salvo casos muy puntuales que están asfaltados. La A-92 se ha seleccionado como caso representativo de la fase de explotación de infraestructura vial. AZVI desarrolla labores de mantenimiento para la conservación de esta carretera que cuenta con varios tramos que en los últimos años han sufrido episodios de inundación (incluyendo la necesidad de cortes de carril o calzada para poder garantizar la seguridad) y que ha derivado en algunos casos en la ejecución de obras para la subsanación de los desperfectos y la adecuación de la disposición del tramo afectado haciéndolo más resiliente frente a posibles futuros episodios de inundación. Por tanto, se trata de una carretera que permitirá validar la metodología de análisis de vulnerabilidad y sobre la que resultaría idóneo el posible planteamiento posterior de medidas de adaptación.
- La variante Beas-Trigueros supone un nuevo trazado con una longitud de 16,700 Km de la carretera N-435 para evitar el paso de los vehículos por las poblaciones de Beas y Trigueros en la provincia de Huelva. La sección transversal del proyecto corresponde a 2 carriles de 3,50 m, arcenes de 1,75 m y bermas de 1,10 m. La variante Beas-Trigueros se ha seleccionado como caso representativo de la fase de construcción de infraestructura vial. Ferrovial dispone de información completa y detallada de esta obra, en la que el diseño inicial se optimizó con la revisión del dimensionamiento de los sistemas de drenaje favoreciendo su resiliencia frente al fenómeno de inundación que se estudia.

La aplicación del procedimiento se ha automatizado con la combinación e integración del soporte GIS (Geographic Information System) y la programación de los algoritmos del proceso (matrices AHP - Analytic Hierarchy Process y desarrollo completo del árbol de indicadores). El formato GIS permite gestionar información espacial geo-referenciada con información semántica asociada, de modo que se maneja la disposición espacial de la carretera y su entorno, vinculando como información semántica asociada cada uno de los valores obtenidos en el análisis de vulnerabilidad.

De Andalucía se dispone, de forma libre y gratuita, de gran cantidad de información de su territorio relativa a las infraestructuras, el terreno o la climatología. Además, esta información se difunde en soporte digital y concretamente a través de varios formatos que se soportan en GIS.

Este hecho facilita tanto la digitalización de la propia infraestructura en formato GIS, como la automatización de la valoración de los indicadores de vulnerabilidad a través del cruce de capas de información en dicho soporte.

Las principales fuentes de información digitalizada del territorio andaluz empleadas son:

- El Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía que pu-

blica vía internet un repertorio (DERA - Datos Espaciales de Referencia de Andalucía) de bases cartográficas de diferente naturaleza geométrica (puntos, líneas, polígonos, imágenes raster) referidas al territorio andaluz.

- La Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM).
- El catálogo de metadatos del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA).

La digitalización de la propia infraestructura en ambos casos se ha ejecutado a partir de los modelos publicados por el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, a partir de los cuales las carreteras se han tramificado en elementos de 1 km (en la A-92) y de 100 m (en la variante N-435).

A continuación, se muestran varios ejemplos de la valoración de indicadores a través del cruce de capas de información de la infraestructura y su entorno en formato GIS:

- Valoración del indicador E5 "torrencialidad de las precipitaciones" en la A-92: Cruzando las capas de información de carreteras y de torrencialidad de la lluvia, publicadas por el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (DERA) y la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM), se asigna a cada tramo de la A-92 el valor 0 - 20 / 20 - 40 / 40 - 70 / 70 - 100 (%) en el campo de información semántica correspondiente.

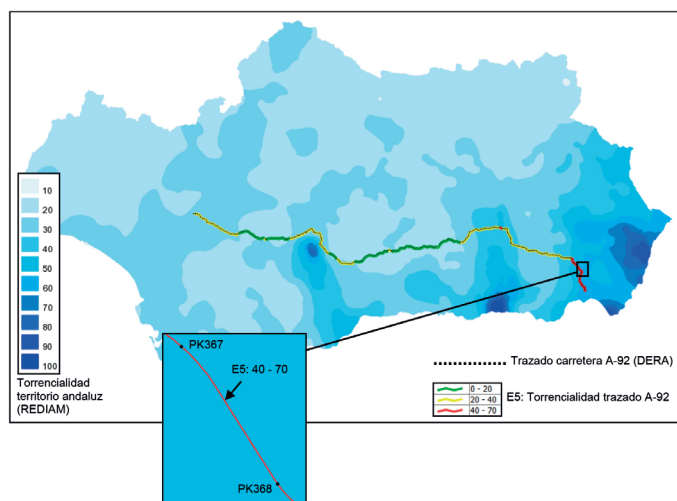


Fig. 4: Valoración de indicador E5 (A-92)

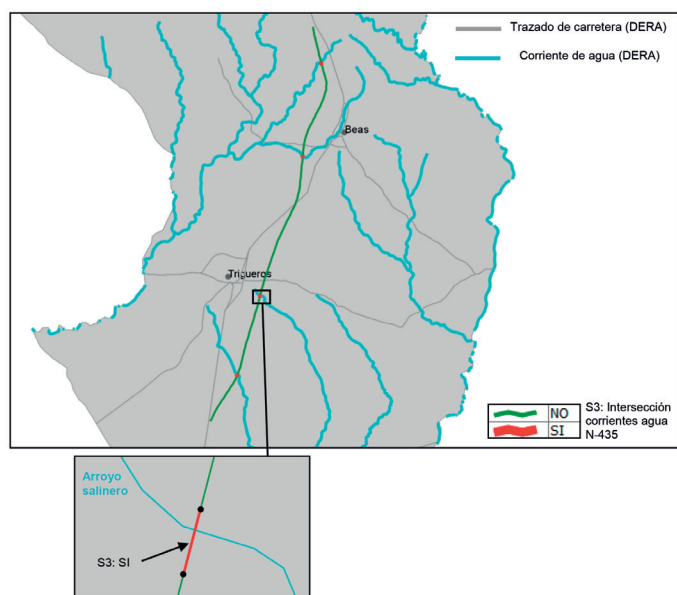


Fig. 5: Valoración de indicador S3 (Variante N-435)

· Valoración del indicador S3 “presencia o intersección de corrientes de agua” en la variante N-435: Cruzando las capas de información de carreteras e hidrografía publicadas por el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (DERA) se asigna a cada tramo de la variante el valor SI/NO en el campo de información semántica correspondiente.

Otro aspecto a destacar, dentro del procedimiento, es la obtención de importancias relativas o pesos de los indicadores de cada bloque y de cada uno de los bloques respecto a los demás.

Como ejemplo se muestran los pesos obtenidos para el caso de los tres bloques, valores que implican un ratio de consistencia de 0,01 (menor al límite máximo de 0,1 impuesto para asegurar la consistencia de dicha asignación).

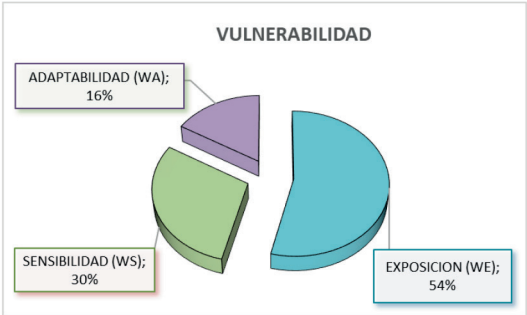


Fig. 6: Peso de cada bloque en la vulnerabilidad

Aplicando de forma automatizada el procedimiento completo descrito en el apartado anterior, se completa el modelo digital de cada infraestructura analizada que incluye:

- la información gráfica espacial y geo-referenciada de la carretera tramificada en elementos/unidades de análisis,
- y la información semántica asociada que incluye la puntuación asignada a los 25 indicadores del árbol de vulnerabilidad (21 indicadores iniciales del panel, 3 indicadores derivados y 1 indicador final) para cada uno de los tramos anteriores.

Sobre este modelo puede visualizarse de forma gráfica e intuitiva (código de colores según gravedad) cada uno de los índices implicados, lo que facilita y simplifica el análisis e interpretación de los resultados y su origen.

Como ejemplo de resultados específicos, a continuación se indican y comentan algunos valores obtenidos en la A-92:

- El índice de vulnerabilidad varía entre el valor extremo mínimo de 2,13 y máximo de 6,37.
- Desgranando por factores:
- El índice de exposición varía entre el valor extremo mínimo de 1,45 y máximo de 7,65,
- El índice de sensibilidad varía entre el valor extremo mínimo de 1,24 y máximo de 7,39,
- El índice de adaptabilidad varía entre el valor extremo mínimo de 3,19 y máximo de 8,33.

Dentro del trazado de la A-92 entre Sevilla y Almería, se encuentran tramos con niveles de vulnerabilidad muy diferentes, desde los muy poco vulnerables hasta otros en los que dicho factor es bastante elevado.

La metodología ha logrado identificar vulnerabilidad en uno de los tramos, ratificada con la ocurrencia de varios incidentes antes y durante la ejecución del trabajo, destacando la situación detectada en octubre de 2018 con corte en la vía por presencia de balsa de agua.

4. CONCLUSIONES

Se ha definido con éxito una metodología para la obtención de un índice único de medición de la vulnerabilidad de una infraestructura de transporte ante un determinado evento climático.

Del análisis de su aplicabilidad en dos casos piloto, destaca la disponibilidad de información digitalizada en el territorio andaluz, que ha permitido automatizar el proceso en gran medida. En otras ubicaciones la búsqueda inicial de información de la carretera, su entorno y climatología, establecerán el grado de su posible auto-

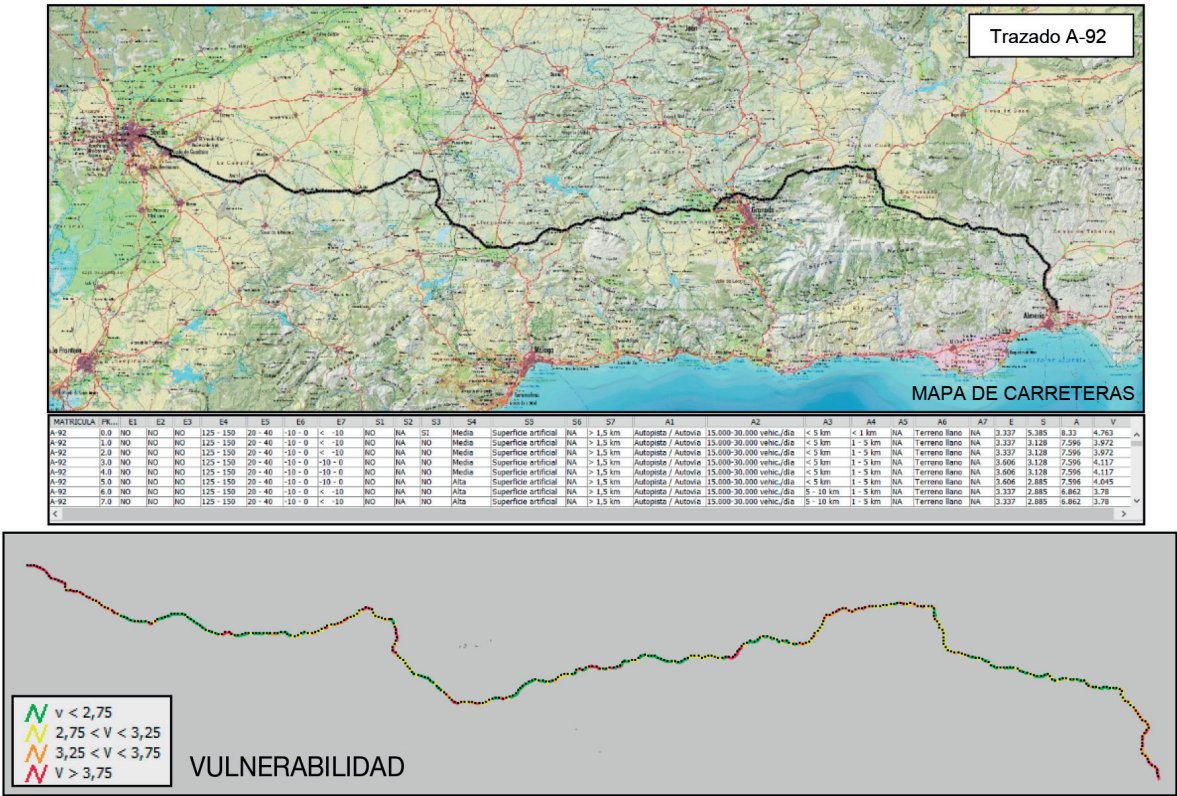


Fig. 7: Modelo digital de vulnerabilidad (A-92)

matización. Dado el nivel medio actual, habrá aspectos cuyo valor será asignado por el usuario de forma manual después de obtener la información por ejemplo de una entrevista con la empresa explotadora o incluso de inspecciones in situ. En cualquier caso, este es un aspecto en continuo avance, siendo actualmente la digitalización una de las direcciones clave de muchas empresas y entidades.

La fase del ciclo de vida en que se encuentra una infraestructura establece una gran diferencia en cuanto al conocimiento de su comportamiento y por tanto en cuanto a la información de partida para el estudio de su vulnerabilidad. Así, muchos aspectos de infraestructuras en fase de diseño o construcción están aún por determinarse mientras que en infraestructuras en explotación se cuenta incluso con registros de sus afecciones o deterioros más habituales o graves.

En cualquier caso, aún existen varios indicadores cuya asignación de valor es muy compleja por la escasez de información disponible (niveles freáticos, costes históricos de reparación o longitudes de rutas alternativas).

En cuanto a la utilidad del análisis también se distingue en función de la fase del ciclo de vida. Así, en fases iniciales, como planificación o diseño, serviría para analizar diferentes opciones de trazado y diseño de la carretera (como el dimensionamiento de estructuras y sistemas de drenaje), de modo que permitiría seleccionar entre ellas la que aportaría una solución más resiliente o menos vulnerable frente a un determinado evento climático. En fases posteriores, como explotación, serviría para detectar los tramos más vulnerables sobre los que priorizar actuaciones o inversiones de mejora.

En ambos casos, profundizar en los resultados del panel de indicadores permitiría conocer el origen principal de dicha vulnerabilidad para optimizar el planteamiento de su diseño o de sus medidas de adaptación.

A futuro, la metodología de análisis de vulnerabilidad desarrollada podrá sufrir sucesivos procesos de optimización conforme la información digital y pública de la carretera, su entorno y el clima vayan ampliándose en cantidad y precisión.

En cualquier caso, el proceso siempre incluirá un grado de incertidumbre al basarse en parte en consideraciones del clima previsto, incertidumbre que se irá reduciendo también con el avance de la ciencia en este campo.

## REFERENCIAS

- [1] European Environment Agency. Adaptation of transport to climate change in Europe. Challenges and options across transport modes and stakeholder. Publications Office of the European Union, 2014. EEA Report No 8/2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.2800/56672>
- [2] Antonio De Rose, Filippou Anagnostopoulos, Anthony Tricot [et al.]. Climate change adaptation of major infrastructure projects. A stock-taking of available resources to assist the development of climate resilient infrastructure. European Commission 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.2776/758755>
- [3] M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof [et al.]. United Nations. International Panel of Climate Change. Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. 2007. 976 p.
- [4] USA. Federal Highway Administration. Climate Change & Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework. FHWA Publication No: FHWA-HEP-13-005. December 2012.
- [5] Chen, X.-Z., Lu, Q.-C., Peng, Z.-R., & Ash, J. E. Analysis of Transportation Network Vulnerability under Flooding Disasters. Transportation Research Record, 2015, 2532(1), p. 37-44.
- [6] Lleras-Echeverri, G., and Sánchez-Silva, M.. Vulnerability Analysis of Highway Networks: Methodology and Case Study. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport, Vol. 147, No. 4, 2001, p. 223-230.

- [7] Edward Helderop, Tony H. Grubisic. Flood evacuation and rescue: The identification of critical road segments using whole-landscape features. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2019, Volume 3, 100022, ISSN 2590-1982.
- [8] Shahmohammadi-Kalalagh, Shahram & Nasiri, Hajar. Flood vulnerability index as a knowledge base for flood risk assessment in urban area. Journal of Novel Applied Sciences, 2014, 2, p. 266-269.
- [9] Balica, Stefania & Wright, Nigel. Reducing the complexity of the flood vulnerability index. Environmental Hazards, 2010, 9, p. 321-339. DOI: <http://dx.doi.org/10.3763>
- [10] Versini, P. -a., E. Gaume, and H. Andrieu. Assessment of the Susceptibility of Roads to Flooding Based on Geographical Information: Test in a Flash Flood Prone Area (the Gard Region, France). Natural Hazards and Earth Systems Sciences, 2010, 10, p. 793-803. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194>
- [11] Viñolas, B. [et al.]. MIVES: modelo integrado de valor para evaluaciones de sostenibilidad. A: Congrés Internacional de Mesura i Modelització de la Sostenibilitat. "II Congrés Internacional de Mesura i Modelització de la Sostenibilitat". Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), 2009, p. 1-24.
- [12] Gómez López, Diego; del Caño, Alfredo; de la Cruz, M<sup>a</sup> Pilar; Josa, Alejandro. Metodología genérica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas constructivos. El método MIVES. 2012. Ed. Asociación Técnica del Hormigón (ACHE).
- [13] MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08). BOE número 203 del viernes 22 agosto 2008.
- [14] MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, Real Decreto 751/2011, de 27 de mayo, por el que se aprueba la Instrucción de Acero Estructural (EAE). BOE número 149 del jueves 23 de junio de 2011.
- [15] Piñero, I., San-José, J. T., Rodríguez, P., & Losáñez, M. M. Multi-criteria decision-making for grading the rehabilitation of heritage sites. Application in the historic center of La Habana. Journal of Cultural Heritage, 2017, No. 26, p. 144-152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.01.012>
- [16] Piñero Santiago, Iñaki; Garmendia Arrieta, Leire; San-José Lombera, José Tomás; Zalbide Sainz de Buruaga, María; Metodología para la priorización de estructuras degradadas. VII Congreso de ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural). A Coruña, junio de 2017. ISSN 0439-5689 v. 68, p. 200.
- [17] Apartado MIVES de la web de la Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Link: <https://deca.upc.edu/ca/proyectos/mives/mives>.
- [18] Thomas L. Saaty; L. Vargas. Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. Rws Pubns. 1994. 477 p. Analytic Hierarchy Process Series, Vol. 6. ISBN-10: 0962031763/ISBN-13: 978-0962031762.
- [19] Thomas L. Saaty. Decision making with the analytic hierarchy process. Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, 2008. p.83-98. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido desarrollado bajo el marco de la colaboración entre el centro tecnológico Tecnalia y las empresas FERROVIAL y AZVI. La actividad ha sido cofinanciada por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), dentro del Programa Operativo de Crecimiento Inteligente 2014-2020, con el objetivo de potenciar la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación, a través de la convocatoria Interconecta gestionada por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI).

Los autores agradecen a Domingo Pérez Mira de AZVI por su ayuda y soporte durante el estudio.

## MATERIAL SUPLEMENTARIO

[https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/\\_adic/9650-1.pdf](https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9650-1.pdf)

