

# METODOLOGÍA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CARRETERAS



COMUNIDAD  
DE ESPAÑA

MINISTERIO DE  
TRÁNSITO, MOVILIDAD  
Y OBRAS PÚBLICAS

SECRETARÍA DE  
ESTADO DE MOVILIDAD

INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE CARRERAS Y  
AUTOPISTAS

INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE CARRERAS Y  
AUTOPISTAS

# **METODOLOGÍA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CARRETERAS**

Junio de 2023

## **COORDINACIÓN DEL GRUPO DE TRABAJO TRANSVERSAL SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO Y RESILIENCIA EN CARRETERAS (ATC)**

Laura Parra Ruiz (CEDEX)

## **PRESIDENTE DEL COMITÉ DE MEDIO AMBIENTE**

Antonio Sánchez Trujillano

## **SUPERVISIÓN TÉCNICA Y COMITÉ TÉCNICO Y DE REDACCIÓN**

Laura Crespo García (Secretaria del CT de Carreteras y Medio Ambiente ATC, CEDEX)

Fernando Jiménez Arroyo (CEDEX)

Alberto Gil Tomás (CEDEX)

## **GRUPO DE TRABAJO**

David López Oliver (INES Ingenieros)

Marta Pertierra Rodríguez (INES Ingenieros)

José Nofuentes Jiménez (Lantania)

Laura Crespo García (CEDEX)

Laura Parra Ruiz (CEDEX)

Fernando Jiménez Arroyo (CEDEX)

Alberto Gil Tomás (CEDEX)

Mónica Laura Alonso Plá (Diputación de Valencia)

Felipe Collazos Arias (MITMA)

Carlos López Díaz (MITMA)

Carolina Ferrandis Pomes (Acciona)

Belén Ferreira Falero (Acciona)

Ana Alcoceba (Audeca)

Catálogo de Publicaciones Oficiales: <https://cpage.mpr.gob.es/>

Tienda virtual de Publicaciones del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible:  
<https://cvp.mitma.gob.es/CVP>

Tienda de Publicaciones del CEDEX: <https://ceh.cedex.es/tienda/>

**Título:** Metodología de adaptación al cambio climático en carreteras. M-146

**Autor:** AA. VV

**Año de la edición:** 2023

## **EDICIÓN DIGITAL**

1ª edición electrónica: 2024

Formato: PDF

Tamaño: 3,67 MB

## **EDITA**

Centro de Publicaciones

Secretaría General Técnica

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible

© CEDEX: Servicio de Publicaciones

NIPO: 797-23-015-9

ISBN: 978-84-7790-655-9

ISSN: 0211-8203

Todos los derechos reservados.

Esta publicación no puede ser reproducida ni en todo ni en parte, ni registrada, ni transmitida por un sistema de recuperación de información en ninguna forma ni en ningún medio, salvo en aquellos casos específicamente permitidos por la Ley.

Publicación incluida en el Programa editorial del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana de 2023 y editada por el Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible de acuerdo con la reestructuración ministerial establecida por Real Decreto 829/2023, de 20 de noviembre.

# ÍNDICE

<b>1. PRÓLOGO</b> .....	<b>5</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
<b>3. ANTECEDENTES METODOLÓGICOS</b> .....	<b>12</b>
<b>4. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA</b> .....	<b>19</b>
4.1 ASPECTOS PREVIOS.....	21
4.1.1 <i>Objetivo y Alcance</i> .....	21
4.1.2 <i>Activos o Servicios a proteger</i> .....	22
4.2 EVALUACIÓN DE IMPACTOS POTENCIALES (FASE 1) .....	23
4.2.1 <i>Elaboración de un listado de impactos predefinidos</i> .....	23
4.2.2 <i>Mapas de amenazas</i> .....	25
4.2.3 <i>Identificación de los impactos relevantes para el tramo de estudio</i> .....	27
4.3 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD (FASE 2) .....	28
4.3.1 <i>Exposición</i> .....	28
4.3.2 <i>Sensibilidad</i> .....	29
4.3.3 <i>Capacidad de adaptación</i> .....	30
4.3.4 <i>Evaluación de la vulnerabilidad</i> .....	30
4.4 EVALUACIÓN DEL RIESGO (FASE 3).....	32
4.4.1 <i>Probabilidad</i> .....	32
4.4.2 <i>Gravedad (Severidad, Magnitud o Consecuencias)</i> .....	34
4.4.3 <i>Evaluación del riesgo</i> .....	37
4.5 EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA (FASE 4). PLAN DE ADAPTACIÓN.....	38
4.5.1 <i>Medidas de adaptación</i> .....	38
4.5.2 <i>Selección de medidas de adaptación (Priorización)</i> .....	38
4.5.3 <i>Implementación y seguimiento del Plan de Adaptación</i> .....	44
<b>5. CASO PRÁCTICO. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A UN ESTUDIO EN DOS DESMONTES EN CANTABRIA</b> .....	<b>46</b>
5.1 EVALUACIÓN DE IMPACTOS (FASE 1). INCLUYE LOS ASPECTOS PREVIOS.....	48
5.1.1 <i>Objetivos y Alcance. Relato</i> .....	48
5.2 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD (FASE 2) .....	48
5.2.1 <i>Exposición</i> .....	48
5.2.2 <i>Sensibilidad</i> .....	50
5.2.3 <i>Evaluación de la Vulnerabilidad</i> .....	51
5.3 EVALUACIÓN DEL RIESGO (FASE 3).....	52
5.3.1 <i>Probabilidad</i> .....	52
5.3.2 <i>Gravedad</i> .....	54
5.3.3 <i>Evaluación del Riesgo</i> .....	56
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>58</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>61</b>
<b>ANEJOS</b> .....	<b>64</b>
<b>ANEJO 1. MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE OBRAS DE TIERRA: DESMONTE Y TERRAPLÉN</b> .....	<b>64</b>
OBRAS DE TIERRA. DESMONTE .....	64
OBRAS DE TIERRA. TERRAPLÉN .....	68
<b>ANEJO 2. MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE ESTRUCTURAS</b> .....	<b>72</b>

<b>ANEJO 3. MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE OBRAS DE DRENAJE TRANSVERSAL.....</b>	<b>76</b>
<b>ANEJO 4. MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE PAVIMENTOS BITUMINOSOS .....</b>	<b>80</b>
<b>ANEJO 5. MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE TÚNELES .....</b>	<b>83</b>
<b>ANEJO 6. MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE AFECCIÓN A MOVILIDAD Y SEGURIDAD .....</b>	<b>88</b>
<b>ANEJO 7. REGISTRO SISTEMÁTICO DE INCIDENCIAS CLIMÁTICAS .....</b>	<b>92</b>

# 1. PRÓLOGO

p

## 1. PRÓLOGO

El cambio climático representa sin lugar a duda uno de los mayores desafíos a los que la sociedad debe hacer frente en los próximos tiempos. A las alturas que nos encontramos del siglo XXI no parece necesario describir sus efectos una vez más: hace tiempo que, en mayor o menor medida, todos los estamos experimentando en nuestra vida diaria. En cuestión de cambio climático la comunidad científica está de acuerdo en varias cuestiones. Una, que la vida en el planeta tal y como la concebimos está en peligro. Otra, que aunque se llegue algo tarde es urgente actuar y con determinación. Y son naturalmente las administraciones públicas las primeras que deben promover esta lucha, dando ejemplo a sus ciudadanos.

La lucha contra el cambio climático es, además de una obligación contraída en el seno de la Unión Europea, un compromiso ético que mantiene desde hace tiempo el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana a través de sus diferentes unidades y en particular a través de la Dirección General de Carreteras.

Como muestra de este compromiso, el Real Decreto 250/2023 por el que se modificó la estructura del Ministerio en el pasado mes de abril, introdujo una serie de cambios en la estructura y funciones de la Dirección General de Carreteras con objeto de reorientar sus objetivos hacia la consecución de una movilidad descarbonizada, sostenible y digital. Fruto de dichas modificaciones es la aparición de una nueva subdirección, la Subdirección General de Sostenibilidad e Innovación, como muestra inequívoca de la necesidad de dotar de medios a nuevas líneas de trabajo.

Esta nueva Subdirección General es por tanto la encargada de abordar los retos que afronta la Red de Carreteras del Estado en materia de digitalización, de innovación y de sostenibilidad. En materia de sostenibilidad, la Subdirección apuesta por el desarrollo de actuaciones en dos ámbitos: mitigación y adaptación.

Con la mitigación se buscan actuaciones que permitan actuar sobre las causas del cambio climático mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Para ello, la Dirección General de Carreteras está llevando a cabo el cálculo de su huella de carbono como instrumento previo para su descarbonización a lo largo de los próximos años. Descarbonización que conllevará, entre otras actuaciones, la implementación de una estrategia de eficiencia energética y de un plan de despliegue de energías renovables en la Red de Carreteras del Estado. El programa de mitigación incluye además otro tipo de medidas como el impulso de la movilidad en bicicleta, competencia que la Dirección General de Carreteras ha adquirido por primera vez con el mencionado Real Decreto.

No obstante, es un hecho constatado que independientemente de la eficacia de las políticas y medidas de mitigación que las administraciones puedan llevar a cabo, los impactos del cambio climático irán a más en las próximas décadas. Por ello, es indispensable que la Dirección General de Carreteras también lleve a cabo actuaciones de adaptación en su red viaria para intentar reducir los impactos y los riesgos derivados del cambio climático en la prestación de servicios.

La adaptación de las carreteras al cambio climático tiene por tanto como objetivo principal la reducción de la vulnerabilidad de las mismas frente a eventos meteorológicos extremos, aumentando su resiliencia. En otras palabras, se busca que las carreteras garanticen su servicio durante el mayor número de horas posibles al año, con independencia de la climatología. En todo caso, si finalmente resultase inevitable un corte de carril, de calzada o de una carretera completa, parece lógico que puedan existir además protocolos de avisos a los usuarios, al igual que ya existen en la gestión de la vialidad invernal.

Aunque las medidas de adaptación que se definan también deberán considerarse en la planificación, diseño y ejecución de los nuevos proyectos, el aspecto crítico reside en la implementación de estas medidas en la gestión de los más de 26.000 kilómetros de red en servicio

## PRÓLOGO

que representa a día de hoy la Red de Carreteras del Estado. Se trata de una red extensa, madura y que soporta diferentes casuísticas climáticas a lo largo del territorio.

Para todo ello la Dirección General de Carreteras está elaborando un plan de adaptación al cambio climático que servirá para detectar los activos más vulnerables de la Red de Carreteras del Estado y establecer diferentes medidas de adaptación y/o alertas, priorizando en función del riesgo al que se encuentran sometidos.

Para la elaboración de este plan se requiere contar con una metodología específica para carreteras con un contenido serio y riguroso, y que a su vez se encuentre avalada por las mejores experiencias nacionales e internacionales en la materia, como son los comités y grupos de trabajo de la ATC y de la PIARC. Es esta metodología de referencia la que se recoge en el documento que se presenta a continuación y que la Dirección General de Carreteras pondrá a prueba a lo largo de los próximos meses.

**ANTONIO MURUAIS RODRÍGUEZ**

SUBDIRECTOR GENERAL DE SOSTENIBILIDAD E INNOVACIÓN DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS, MINISTERIO DE TRANSPORTES Y MOVILIDAD SOSTENIBLE



## 2. INTRODUCCIÓN



## 2. INTRODUCCIÓN

Los efectos sobre nuestras infraestructuras de los eventos meteorológicos, muchos de ellos intensificados por el cambio climático, son cada vez más evidentes. La **Asociación Técnica de la Carretera (ATC)** no es ajena a esta creciente inquietud, por lo que en 2020 se decidió crear, en el seno del Comité Técnico de Medio Ambiente, un **Grupo de Trabajo Transversal sobre cambio climático y resiliencia en carreteras**.

Este Grupo de Trabajo (GT) se constituye como un foro neutral, objetivo e independiente, donde técnicos, tanto del sector público como de la empresa privada, con competencias en distintos ámbitos territoriales, podrán compartir sus inquietudes en relación con la mejor forma de adaptar la red de carreteras española al cambio climático y conseguir una red más resiliente, en un entorno cambiante y que nos mueve a actuar con rapidez.

El presente documento es el resultado de los trabajos realizados en el seno de dicho GT, en concreto los llevados a cabo con el objetivo de desarrollar una **metodología** que permita estimar los posibles riesgos derivados del cambio climático que pueden afectar a las distintas redes de carreteras existentes en España, aunque podría ser aplicable a otros modos de transporte.

Este marco establece un proceso para identificar los activos y servicios de transporte que podrían ser vulnerables a los impactos del cambio climático, evaluar el nivel de riesgo y orientar a las diferentes administraciones y agentes afectados en la toma de decisiones, sobre cuándo, cómo y para qué se debe realizar una respuesta adaptativa.

En el ámbito de legislación nacional se cuenta con la Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental que reúne en un único texto la evaluación ambiental de planes, programas y proyectos, exigiendo que se evalúen los potenciales impactos ambientales tomando como consideración el cambio climático. Esta ley exige por primera vez en la normativa ambiental, que el estudio elaborado por el promotor deberá analizar los efectos del proyecto sobre el cambio climático, y que, entre otras consideraciones contenga una evaluación de la huella de carbono asociada al plan, los impactos ambientales que ocasiona el plan o programa sobre el medio que le sustenta, mermando su capacidad de resiliencia frente a fenómenos climáticos adversos, y evaluando así mismo el impacto que la infraestructura de transporte incluida en el plan, programa o proyecto pueda sufrir por los efectos del cambio climático (inundaciones, deslizamientos de taludes, lluvias y tormentas intensas, aumento del nivel del mar, nevadas, heladas y granizo, aluviones en ríos, avenidas torrenciales, incendios, vendavales, ola fría, etc.), fenómenos todos ellos propios del clima mediterráneo y de nuestras latitudes que en el escenario de cambio climático tendrán mayor recurrencia en el tiempo, lo que hace más vulnerables a las infraestructuras y somete a más estrés al conjunto del territorio.

En concreto para los proyectos de transporte incluidos en el ámbito de la Ley 21/2013, se establece que se redacte un estudio de impacto ambiental que evalúe los efectos previsibles sobre el cambio climático en las fases de ejecución, explotación y en su caso durante la demolición o abandono del proyecto. La metodología propuesta pretende dar apoyo en las distintas fases de un proyecto para evaluar los efectos del cambio climático tal y como lo recoge la ley, con una visión integral y pormenorizada de todos los fenómenos adversos que pueden derivarse del cambio climático y afectar a las infraestructuras de transporte, en particular a las infraestructuras terrestres (carreteras).

Esto debe formar parte de la lógica general de evaluación de riesgos de un proyecto en todas sus fases que impregna todo el proceso de desarrollo, de modo que el riesgo pueda abordarse de una forma integral y no como una evaluación aislada, incluyendo la licitación de servicios de concesiones en carretera (fase de explotación). Se recomienda iniciar el proceso de evaluación de riesgos lo antes posible en el proceso de planificación del proyecto, ya que los riesgos detectados en una fase temprana se suelen poder gestionar o evitar con mayor facilidad y de una manera más eficiente. El objetivo es cuantificar la importancia que los riesgos tienen para el proyecto en las condiciones climáticas actuales y futuras.

La metodología está destinada a ser lo suficientemente flexible, de forma que podría ser aplicada con “atajos” (es decir, es posible independizar la estructura del marco de trabajo de la metodología, PIARC 2023). Por ello, podría ser aplicada por todas las administraciones con competencias en la materia tanto a nivel nacional, regional, provincial y local, recurriendo a unas partes u otras del marco metodológico en función de su situación de partida, de sus necesidades o de los objetivos particulares del estudio.

Si bien el desarrollo de la metodología no ha sido encargado por ninguna administración, la creciente necesidad de enfrentarse a la incertidumbre derivada del cambio climático hará necesaria su implementación en todos los ámbitos de las infraestructuras de transporte, para dotarse de servicios más resilientes.

Para una adecuada implementación de esta metodología es recomendable que las administraciones propietarias de la infraestructura reconfiguren su sistema de funcionamiento, dando paso a un nuevo organigrama con departamentos que incluyan unidades operativas para la consideración de la resiliencia (por ejemplo, creando bases de datos con información de eventos extremos y sus consecuencias para poder proyectar el futuro aprendiendo del pasado; incorporando campos relacionados con la sensibilidad de los activos en los sistemas de gestión; incorporando protocolos de actuación en caso de alertas climáticas; y por encima de todo, impulsando la coordinación y la colaboración entre departamentos). Esto conduce a un proceso de planificación y gestión materializado en un plan de acción, de manera que se puedan prevenir los fallos del sistema de transporte derivados de los efectos climáticos antes de que ocurran. Es necesario así mismo contar con un grupo de expertos multidisciplinar (proyectistas, técnicos en conservación y explotación, ingenieros con conocimientos específicos en hidráulica, geotecnia, firmes y estructuras, así como meteorólogos), que estará encargado de guiar la evaluación y validar los resultados que se obtengan.

En el plan de acción se documentarán diferentes medidas de resiliencia para ciertos activos o tramos de carretera y la prioridad de unas frente a otras teniendo en cuenta que los recursos disponibles son limitados, valorando los aspectos económicos, ambientales y sociales, entre los que se deben tener en cuenta las necesidades territoriales de la población.

Tal y como se ha indicado al comienzo de la introducción, el diseño de esta metodología ha sido planteado en el seno del Grupo de Trabajo “Cambio climático y resiliencia en carreteras” del Comité Técnico de Medio Ambiente de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC). El comité técnico está integrado por profesionales de la administración pública con competencias en la gestión de las carreteras, organismos de investigación en el ámbito del sistema de transporte, la academia y empresas de consultoría y de la construcción y conservación de infraestructuras de transporte.

Por último, antes de comenzar la descripción del trabajo efectuado, es preciso poner de manifiesto que existen multitud de metodologías y procedimientos para efectuar estos análisis. Aun así, en el grupo interdisciplinar creado bajo el amparo de la ATC, se ha considerado que faltaba una guía suficientemente clara, que ayudara a realizar las evaluaciones destinadas a identificar los posibles daños y riesgos a los que se enfrentan las infraestructuras de transporte y por ello se ha propuesto una metodología sencilla y secuencial, que puede verse alterada cuando no se tenga la información suficiente. En todo caso, la metodología que se está proponiendo tiene en cuenta las fuentes más relevantes en la materia, destacando las publicaciones del IPCC, la norma ISO 14090:2019, el documento “*JASPERS Guidance Note - The Basics of Climate Change Adaptation Vulnerability and Risk Assessment*” publicado por JASPERS en 2017 (JASPERS, 2017), el documento “*Technical guidance on the climate proofing of infrastructure in the period 2021-2027*” de la Comisión Europea (EC, 2021) y el marco metodológico propuesto por PIARC (en fase de actualización en estos momentos en el seno del TC1.4).

En esta línea de trabajo se han hecho publicaciones en las que han participado los integrantes del grupo de trabajo como “*Metodología de análisis de adaptación al cambio climático de infraestructuras de transporte*” (Crespo, L. y Jiménez, F., 2020), donde se hace una primera

## INTRODUCCIÓN

aproximación a la metodología aquí planteada, “*Hacia una red de carreteras española más resiliente*” (Alonso, M.L. et al, 2022), que recoge una aplicación preliminar de partes de la metodología y “*¿De qué hablamos cuando hablamos de evaluación del cambio climático en carreteras?*”, en la revista RUTAS (Jiménez & Crespo, 2022), se analiza las definiciones de los diferentes conceptos utilizados en la metodología y se proponen las más acordes a la visión de la ATC. Estas definiciones irán apareciendo a lo largo del presente documento para centrar los objetivos perseguidos en cada una de las fases de la metodología.

Por último, se quiere agradecer a todas las personas e instituciones que han colaborado en el desarrollo de esta metodología.

### **3. ANTECEDENTES METODOLÓGICOS**



### 3. ANTECEDENTES METODOLÓGICOS

Algunas de las primeras referencias destacables en el campo del estudio de los posibles efectos en carreteras se encuentran en los proyectos  **europeos**  RIMAROCC, Roadapt e INFRARISK. En ellos, se dan pautas para identificar los principales elementos que forman parte de un análisis de los posibles efectos del cambio climático en las carreteras. Posteriormente, se han llevado a cabo distintos proyectos europeos, de entre los que destacamos por su reciente finalización, los proyectos CLARITY y FORESEE.

Todos estos proyectos aportan una información muy valiosa para adentrarse en la forma de considerar y abordar el cambio climático en infraestructuras de transporte. Sin embargo, en algunos casos son excesivamente ambiciosos, lo que obliga a recopilar un nivel de información excesivamente elevado, que en general no va a ser posible conseguir. En la mayor parte de los casos, los proyectos no se han continuado una vez finalizado el proceso de financiación de la investigación, de forma que los resultados, pese a ser de gran interés, acaban no siendo aplicados por falta de apoyo institucional y empresarial, al no haberse desarrollado planes de negocio realistas para su continuidad, ni haber contado con una demanda real.

En todo caso, a continuación, se recoge una breve reseña de los proyectos citados, pues todos ellos constituyen, en mayor o menor medida, input para los trabajos desarrollados en la presente metodología.

El objetivo del proyecto **RIMAROCC** (Risk Management for Roads in a Changing Climate- Gestión de riesgos para carreteras en un clima cambiante) es desarrollar un método común de análisis y gestión de riesgos en relación con el cambio climático. El propósito es apoyar la toma de decisiones sobre medidas de adaptación en el sector vial ([Risk Management for Roads in a Changing Climate | TRIMIS \(europa.eu\)](#)).

El proyecto se centra en el “Análisis de Riesgo” (evaluación de riesgos, gestión de riesgos en análisis de coste-beneficio y nivel de riesgo aceptable) y en las “Opciones de Gestión de Riesgos”, prestando atención específica tanto al nuevo diseño de carreteras como a la mejora, mantenimiento y operación de las existentes.

Dentro del proyecto, el primer paso fue establecer un proceso de escucha para identificar las necesidades prioritarias de los usuarios.

El método RIMAROCC está diseñado para satisfacer las necesidades comunes de las administraciones y gestores de carreteras, busca presentar un marco y un enfoque general para la adaptación al cambio climático y está en línea con la norma ISO 31000 sobre gestión de riesgos.

El proyecto **Roadapt** (Roads for today adapted for tomorrow - Carreteras de hoy adaptadas para el mañana), finalizado en 2015, proporcionó un conjunto de pautas para la elaboración de estrategias de adaptación por parte de las administraciones de redes de carreteras. Las directrices cubren los pasos básicos, desde las proyecciones del cambio climático hasta la vulnerabilidad y las evaluaciones socioeconómicas.

- A. Directrices sobre el uso de proyecciones de cambio climático
- B. Directrices sobre la aplicación de un análisis rápido sobre riesgos de cambio climático para carreteras.
- C. Directrices sobre cómo realizar una evaluación detallada de la vulnerabilidad (específicamente en las carreteras de la Red TEN-T).
- D. Directrices sobre cómo realizar una evaluación de impacto socioeconómico (tiempo de viaje como indicador clave).
- E. Directrices sobre cómo llegar a una estrategia de adaptación (medidas y estrategia de adaptación).

Así mismo, se desarrollaron más de 500 medidas de adaptación. Un resumen de la información está disponible en: [ROADAPT integrating main guidelines.pdf \(cedr.eu\)](#)

El Proyecto **INFRARISK** (Novel Indicators for identifying critical INFRAstructure at RISK from natural hazards - Indicadores novedosos para identificar infraestructuras críticas en riesgos por amenazas naturales). La información del proyecto se encuentra en su web ([Drupal | Novel Indicators for identifying critical INFRAstructure at RISK from natural hazards \(infrarisk-fp7.eu\)](#)).

El objetivo central del proyecto INFRARISK es desarrollar un marco de pruebas de estrés para abordar los impactos combinados de los peligros naturales en las redes de infraestructura interdependientes a través de:

- Identificar eventos raros de peligros naturales de baja frecuencia.
- Desarrollar una estructura de prueba de estrés para peligros naturales específicos tanto en sistemas de infraestructura lineal como en puntos nodales.
- Un enfoque integrado para la evaluación de peligros.
- Facilitar la implementación para redes de infraestructura complejas.
- Probar el marco desarrollado a través de casos de estudio.
- Diseminar el "conocimiento" (nivel académico, medios de comunicación, cursos de formación, etc.).

El núcleo metodológico del proyecto se basa en desarrollar una herramienta para evaluar los riesgos asociados de múltiples redes de infraestructura frente a diversas amenazas con correlación espacial y temporal.

El proyecto **FORESEE** (Future proofing strategies FOr RESilient transport networks against Extreme Events - Estrategias de futuro para redes de transporte resilientes a acontecimientos extremos), proporciona herramientas fiables y de confianza para mejorar la resiliencia de la infraestructura de transporte. Es decir, tiene como objetivo reducir la magnitud y/o duración de eventos disruptivos (peligros naturales y antropogénicos), tales como terremotos, inundaciones, incendios o deslizamientos de tierra. A través de nuevas tecnologías innovadoras, metodologías y esquemas resilientes, FORESEE aborda la efectividad de las medidas destinadas a mejorar la capacidad de anticipación, absorción, adaptación y/o recuperación rápida de un evento disruptivo, principalmente en la infraestructura vial y ferroviaria y los centros de transporte. La página web del proyecto recoge toda la información disponible ([foreseeproject.eu](#)).

FORESEE propone el desarrollo de una metodología armonizada de evaluación de la resiliencia y un conjunto de herramientas integrado capaz de reducir las consecuencias con una perspectiva sistémica. Esto consiste en:

- a) La actualización de las mejores metodologías disponibles desde un enfoque basado en desempeño.
- b) Un Sistema de Conciencia Situacional como mejor sistema de adquisición de datos disponible.
- c) Tecnologías innovadoras, como pavimentos permeables, sistemas de estabilización de taludes, drenaje innovador y diseño de intersecciones.
- d) Directrices para la adaptación.

Más información en: <https://cordis.europa.eu/project/id/769373>

El proyecto **CLARITY** (Integrated Climate Adaptation Service Tools for Improving Resilience Measure Efficiency – Herramientas de Servicios Integrado de Adaptación al Clima para Mejorar la Eficiencia de las Medidas de Resiliencia).

Las áreas urbanas y las infraestructuras de transporte que conectan dichas áreas son altamente vulnerables al cambio climático. El uso de la inteligencia climática existente puede aumentar la resiliencia urbana y generar beneficios para las empresas y la sociedad en general.

CLARITY proporciona un ecosistema operativo de servicios climáticos basados en la nube para calcular y presentar los efectos esperados de los peligros inducidos y amplificadas por el cambio climático en el nivel de las funciones de riesgo, vulnerabilidad e impacto.

El objetivo general de CLARITY es demostrar el beneficio de los servicios climáticos para la resiliencia al cambio climático de inversiones vulnerables a gran escala. Los seis objetivos medibles son:

- Desarrollar un Sistema de Información de Servicios Climáticos (CSIS) integrado para la evaluación de la resiliencia de los proyectos de infraestructura a gran escala.
- Maximizar la reutilización y adaptación de datos, tecnologías y servicios existentes.
- Diseño y desarrollo conjunto con proveedores y usuarios finales.
- Demostrar y validar el valor agregado, la flexibilidad y la adaptabilidad de los Servicios CLARITY a las diferencias nacionales y/o regionales.
- Crear una comunidad CLARITY.
- Conseguir una explotación del proyecto continuada en el tiempo.

Si bien todas estas cuestiones fueron abordadas durante el periodo de vigencia de CLARITY, en estos momentos se está estudiando la posibilidad de reutilizar parte de los servicios desarrollados. En cualquier caso, el aprendizaje obtenido en el proyecto CLARITY está incorporado a la metodología propuesta por la ATC. La información del proyecto se encuentra en su web ([Home | Clarity \(clarity-h2020.eu\)](http://Home | Clarity (clarity-h2020.eu))).

En **España**, a nivel nacional se puede decir que los primeros trabajos específicos referidos a los sistemas de transporte, en general y a las carreteras en particular, se iniciaron en 2013. A continuación, se recoge una breve reseña de los dos principales documentos abordados por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana junto con el CEDEX y en colaboración con otras entidades, entre ellas la Oficina Española de Cambio Climático. El primero de ellos se planteó como punto de partida, para determinar las necesidades de las distintas redes troncales de infraestructuras de transporte en España frente a los efectos previsibles del cambio climático.

**Necesidades de adaptación al cambio climático de la red troncal de infraestructuras de transporte en España** (CEDEX et al, 2013).

Los resultados recogidos en este documento fueron elaborados en el marco de un grupo de trabajo integrado por expertos en diferentes modos de transporte del grupo fomento y coordinado por el CEDEX. Dicho grupo de trabajo fue creado con el objetivo de identificar los principales impactos y riesgos del cambio climático que pueden afectar a la red troncal de infraestructuras y su categorización dependiendo de la urgencia percibida de tomar alguna/as medidas de adaptación.

Se toma como punto de partida la información elaborada por AEMET de “escenarios climáticos”, generados para diferentes escenarios de emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) en el horizonte temporal para el conjunto del territorio español.

Cada grupo de expertos modales comenzó por identificar las variables climáticas que inciden en el diseño de cada componente de la infraestructura, y examinaron los datos y registros que disponen en sus bases de datos sobre la vulnerabilidad de la red troncal frente a eventos climáticos y eventos climáticos extremos.

Al tiempo, cada grupo de expertos se encargó de recopilar información sobre la normativa y recomendaciones de diseño donde aparecen las variables climáticas susceptibles de verse alteradas de forma significativa por efecto del cambio climático con efecto en la infraestructura, y sobre las capacidades y limitaciones de los sistemas de alerta meteorológica para anticiparse a la aparición de estos fenómenos.



Con todo ello y con la revisión bibliográfica de actuaciones llevadas a cabo en otros países, cada grupo modal realizó un análisis de las necesidades de adaptación para sus respectivos ámbitos, incluyendo propuestas de medidas de adaptación.

El objetivo era empezar a cuantificar la resiliencia de nuestra red de transporte ante la posible aparición de eventos climáticos extremos, analizando las actuaciones que facilitan su funcionamiento ante la realidad más que probable de estos eventos y, en caso de precisar adaptaciones, cuantificar el coste para prestar el servicio con normalidad.

Posteriormente en 2018, se elaboró un estudio más detallado, aunque todavía a nivel de red, sobre las secciones de la red de carreteras y ferrocarril potencialmente más expuestas por efecto del cambio climático.

**Secciones de la red estatal de infraestructuras de transporte terrestre a las que prestar atención con prioridad por razón de la variabilidad y cambio climáticos** (CEDEX, 2018).

El CEDEX puso en marcha un estudio encaminado a identificar cuáles son las secciones de la red troncal española de infraestructuras de transporte terrestre potencialmente más expuestas a los efectos del cambio climático.

Se sustenta sobre tres actividades principales:

Clasificación de las secciones de la red troncal según grado de criticidad (nivel de uso de la infraestructura y de sus características y funcionalidad).

La identificación del nivel de exposición de la red de infraestructuras al cambio climático (variación prevista de las principales variables climáticas en un escenario de cambio climático y horizonte temporal representativos).

La consideración de los diversos niveles de sensibilidad de la infraestructura al cambio climático (nivel esperable de sensibilidad según los potenciales impactos de los distintos eventos climáticos).

En este caso, el objetivo era generar conocimiento en materia de adaptación en el sector del transporte, para sensibilizar y movilizar a los gestores de la red española de la necesidad de adaptación de la red. Así mismo, se trata de un primer ejercicio que permitió empezar a cuantificar la resiliencia de nuestra red de transporte ante la posible aparición de eventos climáticos extremos y evaluar los posibles efectos del cambio climático en la prestación de servicio de aquellas secciones de la red más vulnerables.

Por último, cabe destacar nuevamente el proyecto CLARITY, ya referenciado con anterioridad a nivel europeo y que permitió realizar un estudio detallado en un tramo específico de carretera. En este proyecto, uno de los casos de estudio se situó en la autovía A-2, en la provincia de Guadalajara, por lo que se realizó un ejercicio de aplicación de la metodología europea (EC, 2013) al ámbito de las carreteras, particularizado además a las características del tramo de estudio y teniendo en cuenta los resultados a nivel de red obtenidos en el informe de 2018 (listado de impactos predefinidos y criterios para la evaluación de los niveles de riesgo). Ello permitió generar una aplicación informática específica para analizar los elementos en riesgo en la sección de la A-2 analizada.

A nivel **internacional**, existen también multitud de trabajos que son referentes en el estudio de impactos por cambio climático en carreteras. No obstante, en el ámbito de este estudio nos vamos a centrar principalmente en los trabajos realizados por la Asociación Internacional de Carreteras (**PIARC**). En 2016, PIARC publicó su primer estudio sobre este tema (PIARC, 2016), en el que se proponía una primera versión de un marco metodológico para ayudar a efectuar estos análisis. En 2019 se publicaron dos nuevos documentos, PIARC (2019a) y (2019b). En el primero de ellos, se actualiza el marco metodológico y en el segundo se presenta una compilación de los principales casos de estudios que se recopilaron. De entre los casos de estudio aportados en el ámbito de PIARC, hay que destacar las aportaciones del Instituto Mexicano de Transporte, (IMT, 2017 e IMT, 2019).

## ANTECEDENTES METODOLÓGICOS

Por último, procede hacer notar otras cuatro referencias que se han de tener en cuenta. La primera son los informes del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). El IPCC fue creado en 1988 para realizar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta. El primer informe de evaluación (FAR) se publicó en 1990 y confirmó los elementos científicos que suscitaban preocupación acerca del cambio climático. Se han ido generando sucesivos informes recogiendo y actualizando esos conocimientos, siendo el último publicado el sexto informe de evaluación (AR6). Así mismo, se han ido actualizando los procedimientos para abordar el estudio de los riesgos vinculados al cambio climático.

El sexto informe de evaluación del IPCC pone un especial énfasis en la protección de las infraestructuras críticas, incluidos los sistemas de energía y transporte, por considerarse que ambos están muy relacionados (el transporte consume en España más del 40% de la energía final), y cada vez estas infraestructuras se ven más afectadas por los peligros de las olas de calor, las tormentas, los incendios, las sequías y las inundaciones, así como por los cambios de evolución lenta, como la subida del nivel del mar.

En la Figura 1 se muestra el planteamiento propuesto por el IPCC para el estudio de riesgos. En ella se aprecia que los “ingredientes” del análisis de riesgos ante impactos vinculados al cambio climático son: peligro, vulnerabilidad y exposición.

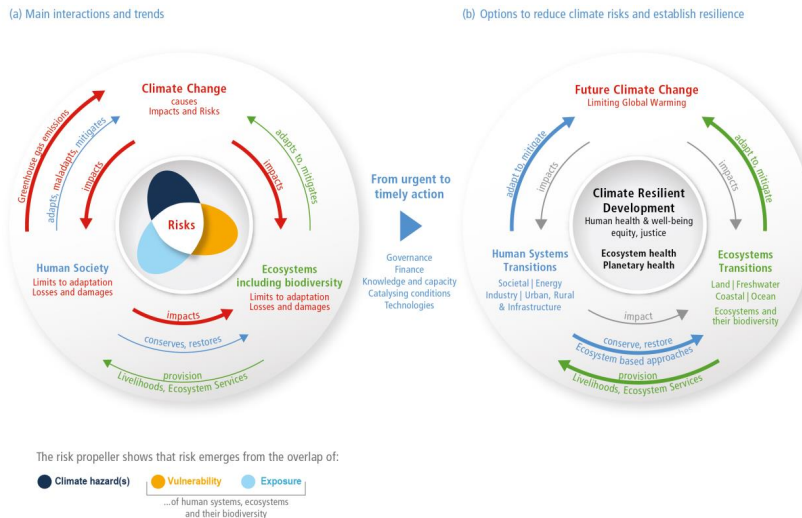


Figura 1. Del riesgo climático al desarrollo de la resiliencia climática: clima, ecosistemas (incluyendo biodiversidad) y sociedad como sistemas acoplados (IPCC, 2022)

La segunda referencia es el trabajo metodológico llevado a cabo por JASPERS (JASPERS, 2017), que comprende la realización de una evaluación de la vulnerabilidad climática, una identificación y evaluación de los riesgos climáticos y la identificación de las medidas de adaptación que deberían ser implementadas en los proyectos con el fin de minimizar los riesgos y aumentar su resiliencia frente al cambio climático.

La tercera referencia es la comunicación de la Comisión Europea (EC, 2021) donde se ofrecen unas orientaciones técnicas sobre la defensa contra el cambio climático de las infraestructuras para el período de programación 2021-2027.

La defensa contra el cambio climático es un proceso que integra medidas de mitigación de las emisiones de GEI y de adaptación al cambio climático en el desarrollo de proyectos de infraestructuras. Permite a los inversores institucionales y privados europeos tomar decisiones fundadas sobre los proyectos que se consideren compatibles con el Acuerdo de París.

El proceso se divide en dos pilares (mitigación y adaptación) y dos fases (comprobación previa y análisis detallado). El análisis detallado está sujeto al resultado de la fase de comprobación previa, lo cual ayuda a reducir la carga administrativa.

El esquema planteado en la siguiente figura resume la metodología seguida en relación con la adaptación al cambio climático.

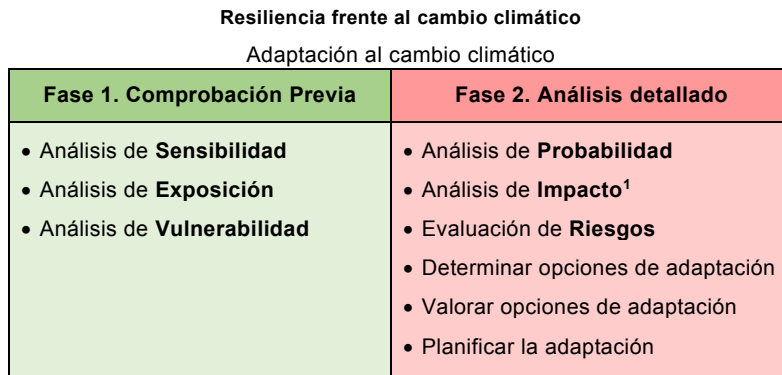


Figura 2. Esquema de metodología de la Comisión Europea  
Elaboración propia a partir de EC (2021)

Como última referencia y con un papel normalizador, se encuentra la norma ISO 14090:2019 (ISO, 2019). La aplicación de este documento puede ayudar a demostrar a las partes interesadas que el enfoque de una organización para la adaptación al cambio climático es creíble. Este documento también puede ser pertinente para las personas y organizaciones involucradas en compras, inversiones y seguros cuando buscan comprender la adaptación al cambio climático de otra organización. Está diseñado para ayudar a las organizaciones a desarrollar medidas e informar sobre la actividad de adaptación de manera verificable.

El enfoque de este documento es pertinente para todos los tamaños y tipos de organizaciones en las que sus actividades, productos y servicios puedan verse amenazados por el cambio climático o, en algunos casos, puedan tomar ventaja de éste.

La naturaleza deliberadamente no lineal del enfoque de este documento permite a las organizaciones adoptar su estructura sin importar en qué etapa se encuentren en la adaptación al cambio climático. La estructura abarca:

- la planificación previa.
- la evaluación de impactos incluyendo oportunidades.
- la planificación de la adaptación.
- la implementación.
- el seguimiento y la evaluación.
- el informe y la comunicación.

A la vista de la disparidad encontrada entre metodologías para estudiar el cambio climático, se ha considerado oportuno proponer una **sistematización de los pasos que facilite su aplicación** a nivel de España. No obstante, se ha de tener en cuenta que dicha **metodología será necesariamente de carácter general**, por lo que deberá ser adaptada, en la medida de lo posible, a las características específicas del tramo (activo y servicio) que se está estudiando.

<sup>1</sup> Esta parte de la metodología de EC (2021) equivale al análisis de la gravedad en la mayor parte de metodologías analizadas, incluida la planteada en este informe.

## 4. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA



## 4. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Según la Guía para el análisis de riesgos asociados al cambio climático elaborada por la Fundación Biodiversidad junto a la Oficina Española de Cambio Climático (FB\_OECC, 2023), existen gran heterogeneidad de riesgos asociados al cambio climático descritos en diferentes metodologías utilizadas para su valoración y que no coinciden en sus planteamientos. Así, en base a los criterios recogidos en esta guía se puede señalar que la metodología descrita en este documento:

- Evalúa principalmente la “vulnerabilidad física” (evaluación descendente, top-down), si bien se tienen en cuenta aspectos sociales a lo largo de la metodología, concretamente en el análisis del Riesgo y de la Resiliencia.
- Consiste en una evaluación basada en cadena de impactos en la que se contempla una única amenaza y un único receptor, que en este caso sería un activo o servicio de una infraestructura de carretera. Esta sería una primera aproximación al análisis de riesgos. No obstante, un estudio que cuente con los recursos suficientes para analizar todos los riesgos derivados de diferentes impactos generados por varias amenazas, normalmente relacionadas entre sí (riesgos multiamenaza), podría estimar de forma más precisa el riesgo al que se enfrenta la infraestructura.
- Tiene en cuenta impactos directos de carácter tangible (daños en bienes o pérdida de vidas) y se pretende considerar riesgos indirectos y de carácter intangible (sociales, como accesos a servicios, o ambientales, como contaminación de aguas).
- Utiliza índices de vulnerabilidad y riesgo relativos que se restringen al ámbito de estudio analizado y en cuanto a la comparación de los valores del riesgo se realiza entre los elementos de cada muestra o caso analizado.
- Pretende ser lo más objetiva posible. Sin embargo, en sus fases iniciales (evaluación de vulnerabilidad y de riesgo) se plantea un análisis que utiliza tanto una aproximación cuantitativa como cualitativa, se utilizan datos de variables o índices climáticos (amenazas) y se tienen en cuenta la opinión de expertos que se utilizan para establecer categorías en base a eventos que han provocado impacto en el pasado. Del mismo modo en la evaluación de la resiliencia se plantea utilizar un análisis cuantitativo para acometer la priorización de las medidas (Análisis Coste – Beneficio), si bien se podría efectuar un análisis más cualitativo, análisis multicriterio, si no se dispusiera de la información suficiente.
- Analiza el riesgo utilizando información climática obtenida de registros históricos y del Visor de AdapteCCA para las proyecciones futuras teniendo en cuenta el efecto del cambio climático en dos escenarios distintos. Con los datos obtenidos se plantea un análisis probabilístico de ocurrencia del impacto y se establecen umbrales en base a criterios de expertos.

Es también importante señalar que los términos utilizados en un análisis de riesgo que hacen referencia a sus diferentes componentes se utilizan de forma diferente en función de la metodología o guía utilizada. Esto dificulta la difusión de los resultados de los estudios a las personas tomadoras de decisiones, interesadas o afectadas (FB\_OECC, 2023).

Por esta razón, como primer paso para ayudar a entender la terminología utilizada y comprender mejor el alcance del estudio de los riesgos asociados al cambio climático que se propone en esta metodología, se hace un paralelismo entre las distintas etapas de análisis de la metodología y las diferentes partes de un **evento climático transformado en relato explicativo**.

Así, este relato es una “mini-historia” que recoge los aspectos que se deben estudiar para conocer y cuantificar el **impacto** que se puede producir sobre un **activo viario o sobre el propio servicio** prestado por la carretera derivado de una **amenaza climática actual o futura**, que se puede ver modificada por los efectos del cambio climático. Este “relato” es el hilo conductor de la metodología propuesta en el marco de la ATC.

A través del siguiente ejemplo sencillo, transformado en “**relato**”, se recoge “un posible análisis de los efectos de un evento climático sobre una carretera”. Es un ejercicio de aproximación que intenta facilitar la comprensión de la metodología (Grupo de Trabajo ATC-PIARC, 2023).

A modo de ejemplo se analizan las consecuencias de un episodio de lluvias intensas sobre un talud de un tramo de carretera.

**Ejemplo de “relato”:**

Las lluvias intensas (**amenaza**) hacen deslizar (**impacto**) un talud de carretera (**activo**) situado en la zona de estudio (**exposición**), debido a sus características geológicas y su pendiente y altura (**sensibilidad**), cada 5 años (**probabilidad**), provocando pérdidas económicas, ambientales y sociales moderadas (**gravedad**) con efectos en el tráfico y en las poblaciones próximas (**criticidad**).

A continuación, se describen los **pasos** que integran la metodología propuesta.

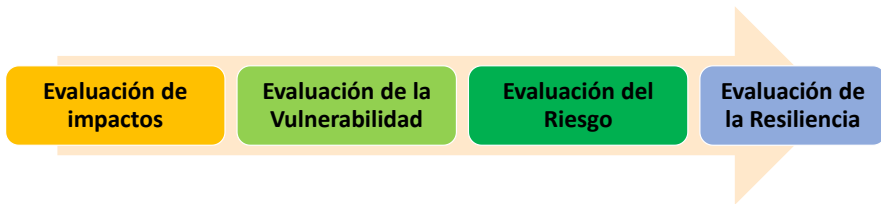


Figura 3. Propuesta de Esquema Metodológico de Evaluación de Adaptación al Cambio Climático del Grupo de Trabajo de la ATC

Adicionalmente, hay una serie de **aspectos previos** que han de tenerse en cuenta antes de proceder a la evaluación propiamente dicha.

## 4.1 ASPECTOS PREVIOS

### 4.1.1 OBJETIVO Y ALCANCE

Esta metodología tiene como **objetivo** describir las consecuencias de los efectos adversos derivados del cambio climático, sus efectos en la gestión del tráfico y la seguridad, incluido el posible impacto en la infraestructura, enumerando y describiendo aquellos elementos que se consideran críticos, definiendo el nivel de criticidad con indicadores de calidad y la capacidad de mantener o no el servicio en las circunstancias cuando el sistema no presta los servicios para los que fueron concebidos (indicadores).

Así mismo, se contempla como objetivo la propuesta de medidas de adaptación para aquellos activos cuyo riesgo supera un determinado umbral y la posterior implementación de un plan de acción que permita el seguimiento de todo el proceso y redunde en el incremento de la resiliencia de la red, así como la adecuada comunicación y coordinación de todos los agentes implicados.

Una vez establecido el objetivo de la metodología, es también necesario establecer el **alcance** del estudio. Es decir, una determinada administración de carreteras puede estar interesada en determinar solamente cuáles son sus activos más vulnerables, a efectos de acometer para todos ellos un plan de mejora general (por ejemplo, planes de limpieza de las ODT). En otros casos, puede interesar dar un paso más e identificar aquellos activos que realmente suponen un riesgo para la gestión de la red, planteando adicionalmente medidas de adaptación específicas. También es preciso dirimir otras cuestiones, tales como si el estudio aborda todas las carreteras del Estado, una demarcación territorial de carreteras, un corredor, un tramo, etc.

Posteriormente se ha de describir las **características territoriales** donde se encuentra ubicada la red de carreteras objeto de estudio. Dentro de éstas se ha de pormenorizar los aspectos sociales, económicos y ambientales de la zona a la que se da servicio. En cuanto a los aspectos sociales se incluyen, entre otros, el tipo de población (pirámide poblacional), nivel de formación, centros educativos y sanitarios, considerando en este análisis la igualdad de género; en los económicos señalar el tejido y tipos de estructuras productivas y la vocación territorial (turismo, tipo de sector agrario, tipología de industrias agrarias ...); en los ambientales se describirían los espacios naturales y las infraestructuras de tratamiento de residuos que dan servicio a la población (vertederos, depuradoras, estaciones de transferencia, parques de EERR...).

Avanzando en el estudio, se ha de detallar las **características de la red de carreteras**: principal o secundaria, intensidad de tráfico, el tipo de servicio que presta dentro del área funcional y su relación con el conjunto del sistema de transporte (criticidad de la infraestructura).

Previo al estudio detallado que se propone a continuación, hay que identificar las **fuentes de información** disponibles. Existen fuentes oficiales tanto a nivel nacional (Instituto Nacional de Estadística -INE-, Centro Nacional de Información Geográfica – CNIG-) como autonómico (por ejemplo, los servicios de Infraestructura de datos espaciales de Castilla y León o el Visualizador de Información geográfica de Cantabria). Se debe recabar toda la información posible sobre los eventos climáticos en la zona que hayan provocado algún tipo de daño sobre la infraestructura o la circulación, sobre las características geológicas, geográficas y de diseño de la red de carreteras, concretando en la definición de activos (Inventarios incluidos en Sistemas de Gestión de distinto tipo de activos que puedan sufrir impactos climáticos). También sería necesario conocer los costes derivados de los mantenimientos correctivos y preventivos que han tenido lugar en la red de carreteras, referenciándolos en el tiempo (cuándo han ocurrido) y en el espacio (dónde han ocurrido), al tiempo que queden descritas el tipo de intervenciones (mallas, bulones, mejora de talud, etc.) y la longitud de las mismas. Toda esta información debe ser fácilmente exportable.

Por último, es preciso constituir un **grupo de expertos** que de apoyo a lo largo de todo el proceso de evaluación. El grupo de expertos ha de supervisar todo el proceso, orientando en la fase de identificación de los principales impactos, así como supervisando la cuantificación de los niveles de sensibilidad, exposición, probabilidad y gravedad de las posibles afectaciones. El grupo de expertos aporta solidez y credibilidad al proceso de evaluación, y de alguna manera contribuirá a mejorar la metodología, a través de la validación de los indicadores que en ella se proponen (mapas, matrices, umbrales, etc.).

#### 4.1.2 ACTIVOS O SERVICIOS A PROTEGER

**Activo (Definición ATC. Grupo de Trabajo ATC-PIARC, 2023):** Elemento (activo de la carretera o servicio de la circulación) receptor de la acción (impacto).

Una vez definido el alcance del estudio, es preciso clasificar entre activos o servicios prioritarios y activos o servicios secundarios; y estos, a su vez, desagregados por tipos de activos.

Ello se debe a que, en una primera aproximación, no va a ser posible analizar todos los activos de la red, ya que el estudio exige cierto nivel de detalle, lo que implica un esfuerzo a nivel de recursos que es preciso optimizar. Por ello, se propone afrontar en primer lugar los que, a priori, presentan un mayor riesgo potencial, a la vista de los proyectos y estudios previos analizados, así como los que designen los integrantes del grupo de trabajo apoyados en su experiencia (si nuestro activo está en el camino *de la amenaza*).

Para cada uno de los activos o servicios prioritarios se detalla en el correspondiente anejo (anejo 1 a 6) los motivos que justifican su consideración como activo prioritario, así como los principales aspectos que determinan su vulnerabilidad frente a los impactos analizados.

Tabla 1. Activos o servicios prioritarios y secundarios

Activos o servicios prioritarios:	Activos o servicios secundarios
Obras de tierra (Anejo 1)	Drenaje Longitudinal
Estructuras (Anejo 2)	Señalización vertical
Obras de drenaje transversal (Anejo 3)	Señalización horizontal
Pavimento bituminoso (Anejo 4)*	Balizamiento
Túneles (Anejo 5)	
Movilidad o Tráfico (Anejo 6)	

\* Se puede plantear la posibilidad de incluir nuevos activos o servicios en futuras actualizaciones de la metodología. Un ejemplo interesante a incluir serían los Pavimentos de Hormigón.

Para cada uno de ellos se deben identificar todas las características posibles que deberían estar recogidas de manera muy pormenorizada en inventarios o en fuentes de datos de la administración competente.

## 4.2 EVALUACIÓN DE IMPACTOS POTENCIALES (FASE 1)

El objetivo de esta primera etapa es identificar los posibles **impactos** sobre los activos o servicios del tramo objeto de estudio.

En primer lugar, es importante aclarar el concepto de impacto. Existen distintas definiciones de impacto, si bien a efectos de la aplicación de esta metodología, tendremos en cuenta la siguiente:

**Impacto (Definición ATC. Grupo de Trabajo ATC-PIARC, 2023):** Acción que se produce sobre el Activo o Servicio carretero a causa de la Amenaza (apartado 3.2.2).

El impacto tiene en cuenta la amenaza y su afección al activo o servicio. Así, un ejemplo de impacto sería el deslizamiento de un talud debido a las lluvias intensas o la aparición de roderas en el pavimento por efecto de las temperaturas máximas elevadas; tal y como se explica a continuación.

### 4.2.1 ELABORACIÓN DE UN LISTADO DE IMPACTOS PREDEFINIDOS

Para comenzar a trabajar, se parte de un **listado de impactos predefinidos**, donde se verá cuáles de ellos son relevantes a los efectos del tramo objeto de estudio. Para elaborar la citada lista, se ha de identificar los principales impactos que habitualmente afectan a las redes de carreteras y que se pueden asociar con las **condiciones climáticas**, tanto actuales



## DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

como futuras. Para ello, se parte de un estudio de los **posibles modos de fallo** de los distintos activos<sup>2</sup> o servicios.

Las condiciones climáticas o suma de condiciones climáticas que activan o influyen de manera determinante en el modo de fallo es lo que, a efectos de esta metodología, denominamos **amenazas**. Por ello, la amenaza se relaciona de forma directa con una o varias **variables climáticas**, que se incluyen de forma directa en el proceso.

Así, por ejemplo:

- una amenaza será la lluvia intensa (torrencialidad) en un periodo corto de tiempo o la subida del nivel del mar. La amenaza lluvia intensa en un periodo corto de tiempo se relaciona con la variable climática P1h (cuando sea posible obtener esta información y sus proyecciones climáticas)<sup>3</sup>.
- otra posible amenaza puede ser la subida del nivel del mar, que viene asociada a un incremento de temperaturas de forma que la variable climática que se analizaría en ese caso sería T<sub>máx</sub> 99 u otro más específico que se pudiera considerar (aunque no es un evento climático en sí mismo, sí es posible vincularlo de manera directa al cambio climático, por lo que se incluye en este estudio como amenaza).

De esta forma, llegamos a la siguiente **tabla** en la que se recogen los principales impactos que pueden afectar a un tramo de carretera, consignando además el activo o servicio afectado y las amenazas climáticas desencadenantes y el modo de fallo involucrado.

Tabla 2. Principales impactos que pueden afectar a los activos y servicios de un tramo de carretera\*

<b>Obras de tierra. Desmante</b>	Desprendimiento de rocas y/o tierra del talud
	Vuelco o toppling
	Deslizamiento traslacional o rotacional (profundo)
	Deslizamiento superficial del talud
	Torrenteras
<b>Obras de tierra. Terraplén</b>	Hundimiento del terraplén por licuación del suelo
	Asiento del terraplén debido a hundimiento por fallo en la cimentación o colapso del cuerpo del terraplén
	Hundimiento por cambio de volumen por pérdida de humedad
	Erosión de taludes en terraplenes próximos a cauce de un río o encauzamiento o ramblas
<b>Estructuras</b>	Degradación acelerada de la superestructura
	Degradación acelerada de la subestructura
	Daños inducidos por el calor en pavimentos
	Riesgo de aumento de deformaciones a largo plazo
	Incremento de problemas de socavación
	Incremento de la acción de las olas en pilares y estribos
	Incremento de cargas inducidas por el viento
Incremento de tensiones inducidas térmicamente	

<sup>2</sup> Podría suceder que la elaboración de este listado tan exhaustivo, en algunos casos, exceda del alcance de este grupo de trabajo. No obstante, la elaboración de ese listado se propondrá como buena práctica en la metodología. Indicando que, para España, se deberán analizar siempre y como mínimo, los identificados en el informe de 2018. Que fueron los que, de acuerdo con el juicio de los gestores de la RCE, más relevancia tienen.

<sup>3</sup> Para obtener esta variable se puede utilizar la información del estudio CEDEX (2021).

	Demanda adicional de capacidad de drenaje
	Mayor presión hidrostática detrás de los estribos de los puentes (precipitaciones, inundaciones)
	Mayor carga en puentes con compuertas de control
	Mayor probabilidad de colisiones
	Mayor probabilidad de accidentes entre vehículos
	Posible golpe de troncos, rocas, etc. sobre las pilas como consecuencia de inundaciones
	Costos operativos adicionales para la retirada de nieve/extensión de sal
	Mayor recurrencia de restricciones temporales en puentes
	Mayor riesgo de cortes de energía
<b>Obras de drenaje transversal (ODT)</b>	Degradación acelerada de la ODT, pérdida de capacidad estructural y funcional por acciones ambientales (ej. ciclos hielo-deshielo)
	Incremento de la erosión y socavación a la entrada y salida de la ODT por incremento en precipitaciones intensas
	Capacidad hidráulica insuficiente del sistema de drenaje por incremento en precipitaciones extremas
<b>Pavimentos bituminosos</b>	Fatiga del firme por acciones térmicas (ciclos hielo-deshielo; diferencias temperatura día-noche)
	Aparición de roderas debido a incremento de las temperaturas máximas
	Fisuración del firme por la acción de fundentes
<b>Túneles</b>	Desprendimiento de rocas del talud
	Vuelco o toppling
	Deslizamiento traslacional o rotacional (profundo)
	Deslizamiento superficial del talud
	Torrenteras
	Delaminación del revestimiento
<b>Afección a la movilidad y a la seguridad vial</b>	Afección por presencia de obstáculos en la calzada (caída de materiales)
	Afección por niebla
	Afección por precipitaciones intensas (incluida agua procedente de torrenteras)
	Afección por nieve
	Afección por hielo
	Afección por viento
	Disminución de la seguridad de la vía por acumulación de agua en el pavimento debido a precipitaciones intensas
	Afección a seguridad de la circulación a la salida de túnel

\*Se trata de un listado abierto. Es decir, siempre cabría incluir otros impactos del tramo que se esté estudiando.

#### 4.2.2 MAPAS DE AMENAZAS

**Amenaza (Definición ATC. Grupo de Trabajo ATC-PIARC, 2023):** Elemento desencadenante de la acción (impacto).

## DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

En primer lugar, hay que identificar la existencia de fuentes de consulta de variables climatológicas y proyecciones de cambio climático a partir de las que se elabora el mapa de amenazas. A partir del listado de impactos potenciales se obtienen también un listado de las principales amenazas que, a priori, se van a estudiar. Se elaborarán mapas con información de la amenaza en su situación actual y en distintos escenarios temporales futuros. Se trabajará para ello con escenarios de medio y largo plazo, siempre que sea posible. La proyección de las variables climáticas implica a su vez seleccionar un determinado RCP.

Los RCPs (Representative Concentration Pathways - Senda de Concentración Representativa) incluyen series temporales de emisiones y concentraciones de todos los gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles y gases químicamente activos, así como los asociados al uso del suelo y la cobertura terrestre.

La palabra representativo significa que cada RCP proporciona solo uno de los muchos escenarios posibles que conducirían a las características específicas de forzamiento radiativo. El término senda enfatiza que no sólo los niveles de concentración a largo plazo son de interés, sino también la trayectoria seguida en el tiempo para alcanzar ese resultado.

Los RCP generalmente se refieren a la parte de la senda de concentración que se extiende hasta 2100, para la cual los modelos de evaluación integrados produjeron los escenarios de emisión correspondientes.

Los cuatro RCP producidos a partir de modelos de evaluación integrados fueron seleccionados de la literatura publicada que abarcan el rango desde aproximadamente un calentamiento inferior a 2°C hasta las mejores estimaciones de alto calentamiento (>4°C) para fines del siglo XXI: RCP2.6, RCP4.5 y RCP6.0 y RCP8.5.

- RCP2.6: una senda en la que el forzamiento radiativo alcanza un máximo de aproximadamente 3 W/m<sup>2</sup> y luego declina hasta quedar limitado a 2,6 W/m<sup>2</sup> en 2100.
- RCP4.5 y RCP6.0: dos sendas de estabilización intermedias en las que el forzamiento radiativo se limita a aproximadamente 4,5 W/m<sup>2</sup> y 6,0 W/m<sup>2</sup> en 2100.
- RCP8.5: Una senda alta que conduce a más de 8,5 W/m<sup>2</sup> en 2100.

Se recomienda usar las proyecciones de las variables e índices climáticos correspondientes a los RCP 4.5 y 8.5. El RCP 4.5 representa la senda de mitigación de emisiones que con mayor probabilidad se cumpla en base a la implementación actual de políticas de reducción de emisiones. El RCP 8.5 es un escenario más pesimista, donde las políticas de reducción de emisiones no han funcionado. Estas son las sendas para las que la información de las variables climáticas que pueden suponer una amenaza está disponible en distintas fuentes, estudios y proyecciones. Además, se recomienda utilizar las proyecciones de RCPs para distintos periodos (Histórico [1971-2000], Futuro cercano [2011-2040], Futuro medio [2041-2070] y Futuro lejano [ 2071-2100]). La principal referencia a este respecto es AdapteCCA aunque existen otras fuentes de información como Copernicus, CEDEX (2021) o SNCZI.

Tabla 3. Principales amenazas, índices o variables climáticas consideradas

Amenaza	Uds.	Fuente	Proyecciones
Amplitud térmica	°C	AdapteCCA	Si
Temperatura máxima extrema	°C	AdapteCCA	Si
Temperatura mínima extrema	°C	AdapteCCA	Si
Precipitación máxima en 24h	mm/día	AdapteCCA	Si
Precipitación máxima en 1h	mm/h	Informe CEH	Si
Precipitación máxima en 3h	mm/h	Informe CEH	Si
Precipitación máxima en 6h	mm/h	Informe CEH	Si

Precipitación máxima en 12h	mm/h	Informe CEH	Si
Máximo N° de días consecutivos con precipitación <1 mm	días	AdapteCCa	Si
Precipitación máxima acumulada en 5 días	mm	AdapteCCa	Si
Velocidad máxima del viento	m/s	AdapteCCa	Si
Inundaciones (Periodos de retorno - T -, 10, 100 y 500 años) (Sin proyecciones)	ARPSIs	SNCZI	No

Nota: El informe CEH se refiere al informe CEDEX (2021) del Centro de Estudios Hidrográficos.

### 4.2.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS IMPACTOS RELEVANTES PARA EL TRAMO DE ESTUDIO

Para identificar los impactos que se han de tener en cuenta en un tramo de estudio es necesario acudir al ente gestor de la infraestructura en cuestión. Este tipo de trabajo debe concienciar a los gestores de las infraestructuras para comenzar trabajos de identificación de fallos acontecidos en su red como consecuencia de eventos climatológicos, intensos o extremos, recogiendo en la medida de lo posible experiencias pasadas. Esta información ordenada, permitirá estimar el cálculo del riesgo que ha sufrido un activo o servicio ante un evento climático y servirá como base para estimar el riesgo que sobrevendrá en el futuro por efecto del cambio climático, al tiempo que permite mejorar el conocimiento de la vulnerabilidad del activo o servicio frente a una amenaza concreta, tanto actual como futura.

Los distintos departamentos ministeriales deben crear grupos de trabajo que caractericen los impactos más relevantes de las infraestructuras y que queden registrados siguiendo el esquema planteado en la metodología propuesta en este documento. En este trabajo se incluirá una ficha con las características del evento a registrar. Junto a las características del evento se detallará el resultado del análisis coste beneficio de las medidas de adaptación aplicadas (incluyendo la variable económica, social y ambiental). Esta información debidamente trabajada ayudará en el futuro a mejorar en la precisión de este tipo de herramientas de gestión, encaminadas a un mantenimiento preventivo (y no reactivo).

A partir del listado de los posibles impactos (basados en los modos de fallo), el grupo de expertos en la gestión de la infraestructura identificará aquellos que son relevantes para el tramo de estudio. Esto se hará teniendo en cuenta lo siguiente:

- Naturaleza y tipología del activo o servicio: que ese modo de fallo sea de aplicación para los activos o servicios objeto de estudio (por ej. si no tenemos puentes de madera, no le afectarán los relacionados con deterioro de la madera).
- Localización del activo o servicio: que ese modo de fallo claramente no sea relevante (por ejemplo, subida del nivel del mar no afectaría a zonas de interior)

Resultados de este primer paso:

- Impactos potenciales relevantes en el caso de estudio.
- Amenazas relacionadas con dichos impactos.
- Variables climáticas de partida.

### 4.3 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD (FASE 2)

**Vulnerabilidad (Definición ATC. Grupo de Trabajo ATC-PIARC, 2023):** Combinación de Exposición y Sensibilidad. Depende de las características del Activo y del tipo de Impacto. No se asocia directamente a ningún elemento del relato antes descrito.

La evaluación de la **vulnerabilidad** se realiza en base a la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación de los activos o servicios. En las referencias documentales de la CE (EC, 2021) el concepto sensibilidad se refiere a las características intrínsecas del activo o servicio, incluyendo su capacidad adaptativa.

$$\text{Vulnerabilidad} = \text{Exposición} \times \text{Sensibilidad}$$

#### 4.3.1 EXPOSICIÓN

**Exposición (Definición ATC. Grupo de Trabajo ATC-PIARC, 2023):** Definido por el lugar donde se produce el impacto.

La evaluación de la **exposición** consiste en determinar en qué grado un activo o servicio, por su ubicación geográfica, puede verse afectado por las distintas amenazas potenciales que se están evaluando. Expresado de una manera algo coloquial, consistiría en determinar “si nuestro activo o servicio está en el camino de la amenaza”.

Para ello, se han de ubicar los activos o servicios objeto de estudio sobre la traza de la carretera. La georreferenciación de los activos o servicios puede ser dificultosa en algunos casos. En el caso de que no se disponga de un inventario a partir del cual se puedan ubicar los distintos elementos sobre la traza de la carretera (por ejemplo, en el caso de los desmontes o los terraplenes), se deberá hacer un recorrido de la traza de la carretera para poder ubicarlos.

Para efectuar la evaluación de la exposición se superponen los distintos mapas de amenaza con el mapa de la zona objeto de estudio con los activos o servicios de la carretera.

Para evaluar el nivel de exposición se han de establecer unos umbrales que dependen de cada variable, índice climático o amenaza y de cada territorio. Estos umbrales vendrán marcados por la experiencia documentada y debidamente registrada y deberán ser coherentes con la zona de estudio. Se trabajará con índices relativos que se restringen al ámbito de estudio. Los niveles de exposición se establecerán en base a estos umbrales preferentemente clasificados en cinco categorías: Muy Baja (1), Baja (2), Media (3), Alta (4) y Muy Alta (5). En caso de que no se tenga información suficiente para establecer estas cinco categorías, al menos deberán buscarse un orden de tres categorías: Baja (1), Media (3) y Alta (5).

Tabla 4. Ejemplo de niveles de exposición de un activo o servicio por inundación.

Exposición	Muy Baja (Inexistente)	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Activo	No afectado por ningún Mapa de Inundación en ningún periodo de retorno	Afectado solo por Mapas de: T=500 años	Afectado solo por Mapas de: T=100 años T=500 años	Afectado solo por Mapas de: T=50 años* T=100 años T=500 años	Afectado por los Mapas de: T=10 años T=50 años* T=100 años T=500 años

T= Periodo de retorno

\* Este mapa no se tiene en cuenta porque no tiene las mismas características del resto de mapas

Nota: Basado en los mapas del SNCZI. Se hace notar que no en todos los casos se dispone de los mapas correspondientes a todos los periodos de retorno<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Periodo de retorno (T): El periodo de retorno es un tiempo de promedio entre sucesos de la misma magnitud y se asocia a la probabilidad del evento.

Se podrían establecer categorías de exposición para los activos o servicios afectados por las amenazas descritas en la Tabla 3, sabiendo que existen ciertas limitaciones para su sistematización. Siguiendo con el ejemplo de las inundaciones, no se dispone de mapas de proyecciones de cambio climático para esta amenaza.

Amenaza	Uds.	Fuente	Proyecciones
Amplitud térmica	°C	AdapteCCa	Si
Temperatura máxima extrema	°C	AdapteCCa	Si
Temperatura mínima extrema	°C	AdapteCCa	Si
Precipitación máxima en 24h	mm/día	AdapteCCa	Si
Precipitación máxima en 1h	mm/h	Informe CEH	Si
Precipitación máxima en 3h	mm/h	Informe CEH	Si
Precipitación máxima en 6h	mm/h	Informe CEH	Si
Precipitación máxima en 12h	mm/h	Informe CEH	Si
Máximo N° de días consecutivos con precipitación <1 mm	días	AdapteCCa	Si
Precipitación máxima acumulada en 5 días	mm	AdapteCCa	Si
Velocidad máxima del viento	m/s	AdapteCCa	Si
Inundaciones (Periodos de retorno - T -, 10, 100 y 500 años) (Sin proyecciones)	ARPSIs	SNCZI	No

Para mejorar el nivel de conocimiento y por tanto establecer la categorización de niveles de exposición de forma más adecuada se tendría que contar con un departamento que inventariase de forma sistematizada los eventos climáticos y los efectos que se han producido en el pasado y que se produzcan de aquí en adelante. En el Anejo 7 se ejemplifica la estructura de la posible ficha donde se recoge la información que podría servir de punto de partida para analizar toda esta información. En IMT (2019) se describe una buena práctica que puede servir como referencia para ilustrar estos contenidos.

### 4.3.2 SENSIBILIDAD

**Sensibilidad (Definición ATC. Grupo de Trabajo ATC-PIARC, 2023):** Características del activo o servicio que condicionan el efecto o grado del impacto (Cómo se produce el impacto).

La sensibilidad de un activo o servicio está relacionada con aquellas características propias que influyen en la afectación del elemento por un determinado impacto.

Para evaluar la sensibilidad se han elaborado, para cada activo o servicio, matrices de sensibilidad<sup>5</sup>. En cada matriz de sensibilidad habrá distintos factores de sensibilidad, que se refieren a los rasgos que pueden influir de cara a verse afectado por un determinado impacto.

<sup>5</sup> Las matrices de sensibilidad se han elaborado tomando como referencia el trabajo previo del Instituto Mexicano del Transporte (IMT, 2019) y se han ampliado para cada activo o servicio por los distintos especialistas integrantes del grupo de trabajo de la ATC.

A la hora de evaluar la sensibilidad futura se supone un adecuado nivel de mantenimiento, al menos coherente con la situación actual.

Del mismo modo que se establece una categorización para los niveles de exposición, en los factores de sensibilidad de las diferentes matrices se han establecido también categorías con una gradación de 1 a 5, matizando la sensibilidad. Las matrices que se han elaborado hasta el momento están recogidas en los Anejos 1 al 6.

Se ha de destacar que se trata de matrices de sensibilidad genéricas que tratan de recoger los principales rasgos de un activo o servicio que pueden influir en su vulnerabilidad. Las matrices tienen como finalidad ayudar a objetivar la evaluación de la sensibilidad de un activo. Siempre que sea posible, las matrices de sensibilidad deberán ser particularizadas a la tipología de activo o características del servicio que se esté analizando y los resultados deberían ser validados por un técnico con experiencia en gestión de la red.

Si se quiere dar más peso a las medidas de adaptación incluidas se ponderaría más este factor de sensibilidad. Por el contrario, si se aprecia que las medidas de adaptación no son necesarias, se puede llegar a considerar que este factor de sensibilidad no tiene peso en la evaluación.

### 4.3.3 CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

**Capacidad de Adaptación (Definición ATC. Grupo de Trabajo ATC-PIARC, 2023):** Se refiere a los aspectos que mejoran la respuesta de los elementos que componen la Vulnerabilidad aumentando la Resiliencia del activo o servicio.

Por capacidad de adaptación, a los efectos de esta metodología, se entenderán todos aquellos elementos "adicionales" que no son necesarios para el adecuado funcionamiento del activo o servicio, pero que se añaden para que funcionen mejor en caso de un potencial impacto o refuerzan el diseño inicial del activo o servicio, precisamente para adaptarlo a impactos que ya han tenido lugar y han afectado al activo o servicio.

A efectos de desarrollo de la metodología lo más práctico ha sido incluir estas consideraciones dentro de las matrices de sensibilidad.

### 4.3.4 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Una vez identificado el nivel de exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación del activo o servicio es posible cuantificar cómo de **vulnerable** es respecto al impacto potencial. Se entiende que es conveniente estudiar cada impacto de manera individual para poder proponer las medidas de adaptación más efectivas, en el caso de que esto sea necesario. Para cada posible impacto, se calcula el nivel de exposición a la amenaza que lo produce y se eligen los aspectos de la sensibilidad (factores de sensibilidad) que van a determinar la vulnerabilidad del activo o servicio para ese posible impacto.

Adicionalmente **cabe la posibilidad** de agregar la información y efectuar un estudio de la vulnerabilidad global del activo, sin identificar por modo de fallo. Es decir, se propondrá dar ambas opciones, evaluar frente a la amenaza (agregado) o por impacto (desagregado). No obstante, en esta metodología se propone que el periodo de recurrencia de una amenaza y su impacto en el activo se pueda valorar en la fase de Evaluación de Riesgo, aunque hay metodologías que lo hacen en esta etapa.

Es decir, para cada impacto potencial relevante se deben seguir los siguientes pasos:

1. Determinar el nivel de exposición, que se calculará a partir de la amenaza determinante del impacto que se está estudiando. Hay que calcular el nivel de exposición presente y futuro.

2. Determinar el nivel de sensibilidad, que será igual a la media ponderada de los factores de sensibilidad relevantes para el activo analizado (identificados a partir de la matriz de sensibilidad completa).
3. Determinar la capacidad de adaptación. En este caso, los factores de adaptación se han incluido como un factor más en la media ponderada que se hace en el apartado anterior.

El valor de la vulnerabilidad se obtendría a partir de la ecuación planteada al comienzo de este apartado, donde se relacionan exposición y sensibilidad. Suponiendo que se establecen cinco niveles para estos dos componentes de lo que se obtendría una matriz en la que también se obtienen cinco niveles de vulnerabilidad. Al valor numérico que caracteriza la vulnerabilidad se puede acompañar una letra para señalar si el mayor peso viene del lado de la exposición o del lado de la sensibilidad. Cuando el valor no se acompaña de ninguna letra la exposición y la sensibilidad tienen el mismo peso. (Ver Figura 4).

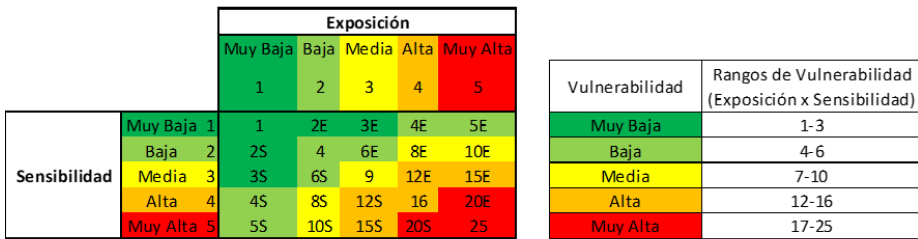


Figura 4. Propuesta CEDEX de Categorías de Vulnerabilidad. Elaboración propia

Si la vulnerabilidad de un activo o servicio resulta categorizada como “Media”, “Alta” o “Muy Alta”, se procederá a efectuar un análisis posterior en la fase de evaluación de riesgo, estudiando las consecuencias que supondría su afectación y cómo de probable es esta afectación. Si, por el contrario, la vulnerabilidad del activo o servicio es “Muy Baja” o “Baja”, no sería necesario este estudio posterior, pues se entiende que el activo o servicio es “resistente” frente al impacto estudiado. Esta forma de proceder está indicada en EC (2021). Para cada caso concreto habría que definir el valor que determina el punto de inflexión para un análisis más fino en la evaluación de riesgo.

La Oficina Española de Cambio Climático plantea en este punto de la metodología un posible reparo, “que existe el peligro de dejar fuera del estudio del riesgo elementos poco vulnerables y que, sin embargo, se demostrara que la probabilidad de fallo o sus consecuencias fueran muy elevadas”. En todo caso, para evitar esta posible situación se puede recurrir a un análisis previo de la criticidad, un análisis previo de activos o servicios totalmente indispensables.

De este modo en esta metodología se propone que se evalúen:

- Los activos o servicios que tengan una vulnerabilidad media o superior.
- Los activos o servicios que teniendo una vulnerabilidad baja presenten una exposición Muy Alta (5E) o una sensibilidad Muy Alta (5S).
- Los activos o servicios que no estando incluidos en alguno de los dos apartados anteriores se establezcan como críticos en base a unos criterios previamente establecidos (ej: población afectada, servicios afectados o tipo de vía).

El resultado de la Fase 2 es un listado de los activos más vulnerables, categorizados según su nivel de vulnerabilidad, que deberán ser analizados a efectos del riesgo.



## 4.4 EVALUACIÓN DEL RIESGO (FASE 3)

**Riesgo (Definición ATC. Grupo de Trabajo ATC-PIARC, 2023):** Combinación de Probabilidad y Gravedad. Depende de las características de la Amenaza. No se asocia directamente a ningún elemento del relato.

La evaluación del **riesgo** se realiza en base a la probabilidad y gravedad del impacto en los activos o servicios.

**Riesgo = Probabilidad x Gravedad** (Severidad, Magnitud o Consecuencias)

La cuantificación tanto de la probabilidad como de la gravedad presenta algunas dificultades. Dicha cuantificación se puede realizar de forma cualitativa, como se hizo por ejemplo en el proyecto CLARITY. Sin embargo, es deseable pasar a un enfoque algo más cuantitativo y objetivado, siempre que sea posible. En todo caso, los planteamientos cuantitativos deberán ser siempre contrastados con el juicio experto.

Se ha de poner de manifiesto que el principal problema al que nos enfrentamos es la falta de información disponible para este tipo de estudios, concepto ya recogido en otras partes del documento y que se repite por la importancia que tiene.

### 4.4.1 PROBABILIDAD

**Probabilidad (Definición ATC. Grupo de Trabajo ATC-PIARC, 2023):** Cuándo y cuántos impactos se producen en un periodo de tiempo.

La probabilidad o posibilidad de que un fenómeno climático se presente es incierta, por lo que estimar un plazo determinado para que un determinado evento ocurra es difícil. Sin embargo, es posible obtener ciertas aproximaciones (a pesar de la incertidumbre futura del clima) basadas en diferentes enfoques (IMT, 2019).

En las referencias documentales de la CE (EC, 2021) se describe también la evaluación de riesgos examinando la probabilidad de que los peligros se materialicen en un plazo determinado, por ejemplo, durante la vida útil del proyecto.

La norma IEC/ISO 31010-2009, sugiere tres enfoques:

- a) El uso de datos históricos relevantes para identificar eventos o situaciones que han ocurrido en el pasado y, por lo tanto, ser capaz de extrapolar la probabilidad de su ocurrencia en el futuro.
- b) La utilización de técnicas de predicción, las cuales permiten realizar pronósticos de probabilidad de ocurrencia de un fenómeno climático.
- c) La opinión de los expertos se puede utilizar en un proceso sistemático y estructurado para estimar la probabilidad, con base en toda la información relevante disponible.

Para determinar la probabilidad de que se produzca un impacto sobre un activo o servicio, en el marco de esta metodología, se plantean los siguientes enfoques.

Recurrir al cálculo de **periodos de retorno**. Los periodos de retorno son una técnica usada comúnmente para representar un estimativo de la probabilidad de ocurrencia de un evento concreto en un periodo determinado. En general, es una variable relacionada con fenómenos hidrometeorológicos. Por ejemplo, mapa de inundaciones (información del SNCZI) o mapas de la metodología mejicana, descritos y recogidos en IMT (2019) (probabilidades de ocurrencia para ciclones tropicales/huracanes).

Por ejemplo, la metodología descrita en López Oliver, D. et al (2022) aboga por el cálculo de estadísticos basados en el histórico de eventos.

En el ejercicio planteado se contó con 20 estaciones meteorológicas en las cuales existían datos de precipitación diaria correspondientes a los últimos 10 años. Estos datos se sometieron a un análisis estadístico por Gumbel para obtener la precipitación máxima diaria para cinco periodos de retorno, definidos así para ligarlos a una escala de clasificación del riesgo. Dependiendo del tipo de territorio el estudio de inundación puede ser fluvial y pluvial o puede incluir también la inundación costera.

Otro planteamiento es recurrir a **experiencias previas** y, de forma cualitativa, estimar la probabilidad de que se produzca el evento o la afectación. En esta línea se encuentra la metodología recogida en IMT, 2019. Para hacer un análisis basado en experiencias previas, el responsable de la carretera deberá tener caracterizados los eventos provocados por el clima: fecha, identificación del emplazamiento, tipo de evento climático extremo, etc. (ver Anejo 7). La recopilación de la información deberá hacerse de forma sistemática y homogénea en todas las demarcaciones territoriales. El caso piloto de Cantabria servirá como referencia para documentar la información requerida, teniendo en cuenta que tanto el grupo de trabajo como los distintos gestores territoriales puedan ir mejorando de manera coordinada los contenidos de esta y así caracterizar los eventos.

Lo adecuado sería identificar el máximo número de eventos que se han producido en el tramo de carretera en un periodo de tiempo lo más extenso posible (al menos de 10 años). Esto serviría para contrastar umbrales para la gestión del riesgo (probabilidad). Por otro lado, también será necesario recopilar la información de las variables climáticas que han motivado el evento. Esta información se puede solicitar a AEMET o a la delegación territorial correspondiente. Esta información será de utilidad para el establecimiento de umbrales de vulnerabilidad (exposición).

Ejemplos de esta caracterización se encuentran en la bibliografía. Se pueden destacar:

- Corominas, J (2007). Ver la Tabla 1 de este artículo. Principales eventos de deslizamiento de España y Principado de Andorra en el siglo XX, donde se identifica el área afectada, la fecha, el desencadenante, el tipo de evento, las consecuencias y la referencia de artículos donde se detalla de forma pormenorizada el acontecimiento.
- Albarrán Guerra, P (2013), "Riesgos naturales de origen geomorfológico en Cantabria". Este trabajo apunta la necesidad de la planificación territorial a nivel regional, remarcando la figura de los Planes de Ordenación Territorial y Urbanística en materia de riesgos naturales. Estos planes, además de gestionar el riesgo mediante la regulación de usos y actividades, introducen otras medidas que contribuyen a reducir la vulnerabilidad<sup>6</sup>. Estos planes incluyen los planes de alerta y emergencia ante un desastre natural. Todo ello los convierte en documentos de planificación territorial como piedra angular para la caracterización de los eventos en el apartado de descripción del territorio.

Cuando no se cuente con información suficiente para elaborar mapas de probabilidades de algún fenómeno en particular o se requiera un análisis más específico, el nivel de probabilidad se puede asignar de acuerdo con el juicio experto de técnicos que conozcan los fenómenos estudiados, como los técnicos de las demarcaciones territoriales, de acuerdo a las categorías de probabilidad recogidas en la Tabla 5. Estas mismas categorías serían de referencia cuando se tiene información suficiente.

---

<sup>6</sup> Los conceptos riesgo y vulnerabilidad están contextualizados en el trabajo de referencia, no en el de la metodología planteada en este estudio.

## DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Tabla 5. Categorías de Probabilidad  
Fuente: Elaboración propia a partir de IMT (2019).

Nivel de probabilidad	Descripción
Muy Alta (5) Casi cierto	Es más probable que ocurra a que no
Alta (4) Probable	Es bastante probable que se produzca
Media (3) Posible	Es posible que pueda ocurrir
Baja (2) Raro	Es poco probable que suceda, pero no es imposible
Muy Baja (1) Improbable	Es improbable que ocurra

De cara a la determinación de la probabilidad, puede llegar a producirse un conflicto en el alcance de la evaluación. Por un lado, en algunos casos, se analiza la probabilidad de que se produzca el evento (por ejemplo, lluvias intensas en 24 horas por encima de un determinado umbral); en tanto que en otros casos el análisis se centrará en la probabilidad de que se produzca el daño o la afectación. En general, y dada la dificultad para obtener datos que sustenten las evaluaciones, se recurrirá a la información disponible en cada caso.

Esta misma reflexión está recogida en el marco metodológico propuesto por PIARC. Según la definición utilizada en PIARC, "riesgo" es una combinación de la probabilidad de que ocurra un evento y las consecuencias del evento. La dificultad de la evaluación de riesgos de eventos relacionados con el clima, el cambio climático y los eventos extremos es que la información de partida sobre probabilidades es limitada. Existe una discrepancia entre la probabilidad de un determinado fenómeno climático y la probabilidad de un evento no deseado causado por este fenómeno. Por ejemplo, un evento de precipitación de 1 en 100 años no causará un fallo de drenaje de 1 en 100 años.

### 4.4.2 GRAVEDAD (SEVERIDAD, MAGNITUD O CONSECUENCIAS)

**Gravedad (Definición ATC. Grupo de Trabajo ATC-PIARC, 2023):** De cuánto es y qué consecuencias tiene el impacto que se produce.

La **gravedad** puede relacionarse con la **magnitud o la intensidad** del evento de **peligro natural** (como la escala de Richter de un terremoto o categorías de ciclones tropicales según la escala Saffir-Simpson), con el **tamaño del impacto causado** por el evento (como la inundación de una carretera, daño a un puente por calor, un deslizamiento de tierra en un lugar particular, etc.) o **sus consecuencias**, si llegara a realizarse, independientemente de la probabilidad de ocurrencia. Si se relaciona con impactos, generalmente se evalúa por los efectos adversos en un sistema, comunidad o en el medio ambiente.

Este concepto se valora a través de la escala de gravedad de sus consecuencias. Para su valoración, se pueden tener en cuenta distintos factores como pueden ser los siguientes:

METODOLOGÍA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CARRETERAS

Tabla 6. Matriz para la determinación de la gravedad en función de las potenciales consecuencias\*

Código Factor	Escala	Muy baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy alta (5)
	Factor de Gravedad	Consecuencias				
1	Población afectada	Menos del 1% de la población a la que da servicio la infraestructura	Entre el 1-2% de la población a la que da servicio la infraestructura	Entre el 2-5% de la población a la que da servicio la infraestructura	Entre el 5-10% de la población a la que da servicio la infraestructura	Más del 10% de la población a la que da servicio la infraestructura
2	Coste de la intervención (reparación o reconstrucción) (PIARC 2023)	Menos de 1M€	Entre 1M€ y 2M€	Entre 2M€ y 5M€	Entre 5M€ y 10M€	Mas de 10M€
3	Tráfico afectado (IMD)	<2.000	2.001-7.500	7.501 – 15.000	15.001 – 25.000	>25.000
4	Tráfico de vehículos pesados afectado (% de la IMD)	<5%	6-10%	11-20%	21-30%	>30%
5	Tipo de vía	Camino Rural	Carretera local/comarcal	Carretera Convencional	Carretera multicarril	Autovía/ Autopista
6	Acceso a servicios básicos (Opciones alternativas de acceso) Especial atención a grupos vulnerables	No afección a servicios básicos		Afección a servicios básicos, pero existen itinerarios alternativos		Afección a servicios básicos sin alternativa
7	Economía y Empleo	Afección puntual a negocios y empleos		Afección media a negocios y empleos		Afección a todos los negocios y empleos

**NOTAS:**

1. Por población afectada se entiende el número de habitantes que se encuentra en la zona de influencia del impacto con respecto a la población que obtiene el servicio de la red de carreteras definida en el objeto del estudio.

2. En algunos documentos (PIARC, 2023) se incluyen las pérdidas económicas ocasionadas en la zona de influencia en términos de empleo local, interrupción de servicios básicos, eventos y otras actividades sociales y de afección a la cadena de suministro y otras partes involucradas.

Se hace notar que se pueden dar tanto costes de intervención como costes de mantenimiento y que pueden producirse de forma simultánea o por separado. En general los costes de mantenimiento suelen presentar una partida fija en los contratos, por lo que es difícil estimar

el coste de los efectos provocados por los eventos climáticos en los presupuestos de conservación, si bien es previsible que el cambio climático provoque un aumento de estos costes.

Es decir, puede suceder que la afectación provoque solo un incremento de los costes de mantenimiento o que requiera una intervención con costes de reparación o sustitución.

3. Las categorías de este factor de gravedad se basan en la información obtenida de "Estimación del Tráfico de la Red de Carreteras del Estado (RCE) (Resumen 2019. MITMA) y del "Diagnóstico del tráfico en la red de carreteras de la Comunidad de Madrid durante el año 2020 (Tráfico 2020. Comunidad de Madrid).

Cuando se realice el estudio conviene que en cada territorio se exploren las IMDs propias de cada zona de influencia.

6. Centros de producción de energía, hospitalarios, educativos, nodos de logística y vertederos o actividades turísticas y naturaleza.

\* Además de las consideraciones específicas para cada factor de gravedad habría que tener en cuenta los siguientes aspectos generales:

- Existen algunos elementos que se deben tener en cuenta a la hora de valorar los factores de gravedad, entre los que se encuentran la reputación de los gestores o el efecto de la opinión pública.
- Es necesario ponderar los pesos de cada uno de los factores en base a cada estudio concreto. En algunas ocasiones se puede llegar a prescindir de algún factor de gravedad, ya sea por falta de información o por su baja o nula influencia en el estudio.
- Para generar la matriz de gravedad se han utilizado como referencias:
  - IMT (2019) Marco Metodológico para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático en México. Instituto Mexicano del Transporte (IMT).
  - EC (2021). Commission Notice. Technical guidance on the climate proofing of infrastructure in the period 2021-2027. European Commission (EC).
  - PIARC (2023). Marco Metodológico de Adaptación de Infraestructuras de Carretera al Cambio Climático.
  - Información de MITMA y Comunidad de Madrid sobre IMDs.

Todos los aspectos relacionados con los factores de gravedad no son fáciles de valorar de forma objetiva por la falta de información sistematizada y organizada, lo que también puede suceder en algunas de las fases anteriores de la metodología.

Se pueden valorar otros factores de gravedad como los propuestos por la Comisión Europea (EC, 2021), "Magnitud de las consecuencias en las distintas áreas de riesgo".

Para dar un valor final de la gravedad existen dos posibles opciones:

1. Que la puntuación final sea la del factor con una mayor gravedad. Por ejemplo, si un factor de gravedad se califica como 5 (Muy Alto) y todos los demás factores se califican como 4 (Alto), entonces el valor final sería 5 (Muy Alto). (PIARC, 2023)
2. Que la puntuación final se obtenga ponderando la gravedad de los diferentes factores.

Este ejercicio de baremación debe adaptarse de acuerdo con las necesidades y prioridades de cada caso particular. Así mismo se ha de tener en cuenta que los criterios de puntuación de los factores de gravedad planteados como referencia en esta metodología se podrían mejorar trabajando con las distintas partes interesadas, conocedoras de los aspectos más importantes que se deberían utilizar para evaluar los impactos o las consecuencias en la zona de estudio.

En la determinación de la “Gravedad” se incorporan algunos criterios que ya tienen en cuenta la Criticidad (IMD, tipo de vía, etc.) de la zona afectada. Sin embargo, los factores que componen la Criticidad deberán tenerse en cuenta de forma más detallada en la Evaluación de la Resiliencia, concretamente en el Análisis Coste Beneficio que permitirá priorizar las medidas de adaptación propuestas y necesarias para alcanzar los objetivos de adaptación.

Al igual que en las etapas anteriores, en el caso de no poder recopilar la información necesaria, se podría hacer una evaluación cualitativa de la severidad o gravedad de la afectación. En ese caso, habría que contar con la opinión de expertos en la gestión del activo o servicio.

### 4.4.3 EVALUACIÓN DEL RIESGO

El valor del riesgo se obtendría a partir de la ecuación planteada al comienzo de este apartado, donde se relacionan probabilidad y gravedad. Suponiendo que se establecen cinco niveles para estos dos componentes se obtendría una matriz en la que también se obtienen cinco niveles de Riesgo. Al valor numérico que caracteriza el riesgo se puede acompañar una letra para señalar si el mayor peso viene del lado de la probabilidad o del lado de la gravedad. Cuando el valor no se acompaña de ninguna letra la probabilidad y la gravedad tienen el mismo peso.

		Probabilidad				
		Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Gravedad	Muy Baja	1	2	3	4	5
	Baja	1	2P	3P	4P	5P
	Media	2G	4	6P	8P	10P
	Alta	3G	6G	9	12P	15P
	Muy Alta	4G	8G	12G	16	20P
		5G	10G	15G	20G	25

Riesgo	Rangos de Riesgo (Probabilidad x Gravedad)
Muy Bajo	1-3
Bajo	4-6
Medio	7-10
Alto	12-16
Muy Alto	17-25

Figura 5. Propuesta CEDEX de Categorías de Riesgo. Elaboración propia

Valorar lo que supone un nivel de riesgo aceptable o significativo es responsabilidad del promotor y del equipo de expertos que lleva a cabo la evaluación del proyecto. Cualquiera que sea la categorización que se utilice, debe poderse defender (estar descrita de forma clara y lógica e integrada de manera coherente en la evaluación global de riesgos del proyecto). Independientemente de cuál sea el proceso de valoración, si el análisis de riesgo refleja que la gravedad es muy alta, aunque la probabilidad sea muy baja el análisis de las consecuencias y la aplicación de las medidas de resiliencia se tienen que poner en marcha (EC, 2021).

La evaluación del riesgo es la fase crítica de la metodología. Reúne toda la información y las evaluaciones previas sobre el enfoque del proyecto en la evaluación de la vulnerabilidad y proporciona el punto de partida para el trabajo de la evaluación de la resiliencia en el que se determina cuál es la mejor manera de responder a los impactos derivados del cambio climático.

El resultado de esta etapa es la identificación y priorización de activos o servicios en riesgo, para los que habrá que evaluar su resiliencia y proponer un plan de adaptación.

## 4.5 EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA (FASE 4). PLAN DE ADAPTACIÓN

**Resiliencia (Definición ATC. Grupo de Trabajo ATC-PIARC, 2023):** Análisis de todos los elementos anteriores para procurar la mejor respuesta del servicio o activo frente al cambio climático.

El objetivo de esta fase es dotar a los gestores de carreteras (administraciones y empresas) de herramientas de análisis para aumentar la resiliencia de la red para prevenir incidentes o reducir el impacto que las condiciones meteorológicas (normales y extremas, en el momento actual y en los horizontes temporales evaluados) están teniendo sobre la infraestructura carretera (IMT, 2019).

En las fases anteriores se evalúa el grado de vulnerabilidad y el nivel de riesgo de activos y servicios de la carretera con la finalidad de priorizar si requieren una atención inmediata o más a largo plazo. En la presente etapa se pretende identificar y seleccionar algunas medidas de adaptación para ciertos casos de estudio, siendo conscientes que para cada riesgo existen medidas de adaptación específicas.

### 4.5.1 MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

La adaptación implica, normalmente, la adopción de una combinación de medidas estructurales y no estructurales. Las medidas estructurales comprenden la modificación del diseño o las especificaciones de los activos físicos y las infraestructuras, o la adopción de soluciones alternativas o mejoradas, teniendo en cuenta las soluciones basadas en la naturaleza (SBN). Las medidas no estructurales comprenden la planificación de la utilización del suelo, la mejora de los programas de seguimiento o de respuesta a emergencias, la formación del personal y las actividades de transferencia de capacidades, la elaboración de marcos estratégicos o empresariales de evaluación de riesgos climáticos, las soluciones legislativas y financieras, como los seguros contra fallos en la cadena de suministro, o los servicios alternativos. (EC, 2021). Entre las medidas no estructurales procede destacar la implementación de medidas relacionadas con la operación y el mantenimiento de la infraestructura, así como la monitorización de los distintos elementos de la red, a partir de los cuales se puede proporcionar información y alertas para los usuarios.

La identificación de respuestas y estrategias de adaptación tendrá lugar a través del juicio profesional, la experiencia y el conocimiento de la red vial.

Sería deseable contar con un documento que recoja las medidas de adaptación para los distintos impactos considerados incluyendo coste estimado de la actuación, ejemplos de uso, etc. En todo caso en la bibliografía existen numerosos ejemplos.

Los gestores de la carretera podrán elaborar una lista priorizada de respuestas de adaptación, que puede ir acompañada de un Plan de Acción para facilitar la entrega de estas actividades.

En el siguiente apartado se plantean los tipos de análisis que se pueden realizar para efectuar la priorización de las medidas.

### 4.5.2 SELECCIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN (PRIORIZACIÓN)

Este apartado persigue la selección y priorización de respuestas y estrategias de adaptación partiendo de recursos escasos que es necesario evaluar priorizando las medidas más efectivas para cada caso. Dentro de esta priorización un factor clave es la redundancia de las

infraestructuras de transporte, de manera que las medidas no son tan necesarias de implementar cuando existen vías alternativas para prestar el servicio (ejemplo de criticidad de las infraestructuras).

**Criticidad (Definición ATC. Grupo de Trabajo ATC-PIARC, 2023):** Características que hacen indispensable un activo o servicio y que sufren el impacto.

Los métodos propuestos para hacer este tipo de análisis son el análisis multicriterio (AMC) y el análisis de coste-beneficio (ACB), cuyos procedimientos se describen a continuación. Estos esquemas de trabajo son los más seguidos en la documentación de referencia (PIARC, 2016, IMT, 2019, EC, 2021 y PIARC 2022).

#### 4.5.2.1 ANÁLISIS MULTICRITERIO (AMC)

El AMC tiene un enfoque estructurado a través de criterios que pueden ser tanto cualitativos como cuantitativos, y toma en cuenta aspectos monetarios y no monetarios (IMT, 2019).

Para la aplicación de este análisis se pueden definir ciertos criterios que se referirán al coste de implementar la medida, la viabilidad de su realización, los posibles impactos ambientales que se pueden generar, su capacidad para adaptarse a nuevas circunstancias, entre otros. A modo de ejemplo, se muestra la Tabla 7 los criterios recogidos en IMT (2019).

Tabla 7. Criterios para la aplicación de AMC (IMT, 2019)

Nº	Criterio	Descripción del criterio
<b>Adaptación</b>		
1	Cumplimiento del objetivo	Evalúa el grado en que la medida de adaptación propuesta permite atender con éxito el problema/riesgo identificado.
2	Nivel de resiliencia	Nivel en el cual la práctica de adaptación o estrategia conserva, restaura y/o contribuye a alcanzar adecuados niveles de resiliencia.
3	Vinculación	La medida de adaptación puede vincularse o ser incorporada a otros instrumentos sectoriales, tales como los programas de mantenimiento de carreteras.
<b>Económicos</b>		
4	Coste (inversión inicial)	El coste de inversión para implementar la propuesta de adaptación conforme a su proyecto
5	Coste (coste del ciclo de vida)	El coste total, que puede apoyarse en un análisis de coste de ciclo de vida de proyecto, el cual incluye los costes de mantenimiento y conservación de la medida de adaptación
<b>Técnicos</b>		
6	Factibilidad técnica	Evalúa la factibilidad de la medida de adaptación, en términos de disponibilidad de tecnología, procedimiento constructivo, personal capacitado, etc.



DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Nº	Criterio	Descripción del criterio
7	Duración	Establecer los plazos de implementación es necesario cuando se define una práctica o estrategia, así como para seguimiento.
8	Robustez	La robustez de una medida de adaptación refleja el grado en que ésta puede ser sensible frente a la incertidumbre asociada al cambio climático.
9	Flexibilidad	La medida de adaptación permite ser adaptada nuevamente para incorporar necesidades futuras durante su vida útil
10	Disponibilidad de recursos	Evalúa si se cuenta con los recursos disponibles (económicos, materiales y humanos), las habilidades y los conocimientos en la organización de carreteras para implementar las respuestas de adaptación inmediatamente.
<b>Sociales</b>		
11	Población beneficiada	En caso de existir un beneficio para la población, se busca que la medida de adaptación sea capaz de impactar positivamente a la mayor cantidad de personas.
12	Participación social	Es importante la participación de las comunidades vulnerables y población en general con los agentes públicos en el diseño, planificación e implementación de la práctica de adaptación.
13	Aceptación social y política	La medida de adaptación tiene o no aceptación social/política, forma parte de las preocupaciones públicas, etc.
14	Riesgo de no acción	Evalúa la implicación de no hacer nada, cuál sería el impacto en el medio o los servicios en caso de materializarse el riesgo.
<b>Ambientales</b>		
15	Impacto ambiental	Evalúa el impacto ambiental de la respuesta de adaptación
16	Grado de protección del medio ambiente	Se refiere a que si la medida(s), acción(es), y/o estrategia(s) de adaptación conserva, restaura y/o hace <u>un uso sostenible de los recursos naturales.</u>

Cada criterio descrito en la tabla anterior debería ser evaluado (en función de la información disponible) y si se desea se puede ponderar a fin de darle más valor a los criterios que puedan tener un mayor impacto en la toma de decisiones.

En la Tabla 8 (IMT, 2019) muestra un ejemplo de valoración de criterios de evaluación de medidas de adaptación.

Tabla 8. Valoración de criterios de evaluación de medidas de adaptación (IMT, 2019)

Criterio	Evaluación				
	5	4	3	2	1
Cumplimiento del objetivo	La medida de adaptación supera lo esperado	La medida de adaptación cumple con lo esperado	La medida de adaptación puede cumplir con lo esperado	La medida de adaptación está por debajo de lo esperado	La medida de adaptación está muy por debajo de lo esperado

METODOLOGÍA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CARRETERAS

Criterio	Evaluación				
	5	4	3	2	1
Nivel de resiliencia	La medida contribuye a un nivel muy alto de resiliencia	La medida contribuye a un nivel alto de resiliencia	La medida contribuye a un nivel medio de resiliencia	La medida contribuye a un nivel bajo de resiliencia	La medida contribuye a un nivel muy bajo de resiliencia
Vinculación	Existe vinculación o integración con cuatro o más políticas, programas, etc.	Existe vinculación o integración con al menos tres políticas, programas, etc.	Existe vinculación o integración con al menos dos políticas, programas, etc.	Existe vinculación o integración con al menos una política, programa, etc.	No existe vinculación o integración con otras políticas, programas, etc.
Coste (inversión inicial)	El coste se considera muy bajo	El coste se considera bajo	El coste se considera medio	El coste se considera alto	El coste se considera muy alto
Coste (coste del ciclo de vida)	El coste total se considera muy bajo	El coste total se considera bajo	El coste total se considera medio	El coste total se considera alto	El coste total se considera muy alto
Factibilidad técnica	Todos los aspectos técnicos pueden implementarse	Un aspecto técnico limita su implementación	Dos aspectos técnicos limitan su implementación	Tres aspectos técnicos limitan su implementación	Cuatro o más aspectos técnicos limitan su implementación
Duración	La implementación se puede hacer inmediatamente	La implementación se puede hacer en un corto plazo	La implementación se puede hacer en un corto-medio plazo	La implementación se puede hacer en un medio plazo	La implementación se puede hacer en un largo plazo
Robustez	La medida de adaptación tiene una robustez muy alta	La medida de adaptación tiene una robustez alta	La medida de adaptación tiene una robustez media	La medida de adaptación tiene una robustez baja	La medida de adaptación tiene una robustez muy baja
Flexibilidad	La medida de adaptación es completamente flexible	La medida de adaptación permite modificaciones importantes	La medida de adaptación permite modificaciones medias	La medida de adaptación permite pequeñas modificaciones	La medida de adaptación no permite modificaciones
Disponibilidad de recursos	La organización cuenta con todos los recursos disponibles	La organización no cuenta con disponibilidad de uno de los recursos necesarios	La organización no cuenta con disponibilidad de dos de los recursos necesarios	La organización no cuenta con disponibilidad de tres de los recursos necesarios	La organización no cuenta con los recursos disponibles

## DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Criterio	Evaluación				
	5	4	3	2	1
Población beneficiada	El porcentaje de beneficiarios se considera muy alto	El porcentaje de beneficiarios se considera alto	El porcentaje de beneficiarios se considera medio	El porcentaje de beneficiarios se considera bajo	El porcentaje de beneficiarios se considera muy bajo
Participación social	La participación social se considera muy alta	La participación social se considera alta	La participación social se considera media	La participación social se considera baja	La participación social se considera muy baja
Aceptación social y política	La medida de adaptación tiene una aceptación muy alta	La medida de adaptación tiene una aceptación alta	La medida de adaptación es medianamente aceptada	La medida de adaptación tiene una aceptación baja	La medida de adaptación tiene una aceptación muy baja
Riesgo de no acción	El coste de la inacción será muy alto	El coste de la inacción será alto	El coste de la inacción será medio	El coste de la inacción será bajo	El coste de la inacción será muy bajo
Impacto ambiental	El nivel de los impactos ambientales es nulo	El nivel de los impactos ambientales es poco significativo	El nivel de los impactos ambientales es medianamente significativo	El nivel de los impactos ambientales es significativo	El nivel de los impactos ambientales es muy significativo
Grado de protección del medio ambiente	Grado de protección muy alto	Grado de protección alto	Grado de protección medio	Grado de protección bajo	Grado de protección nulo

En FWHA (2018) se listan una serie de criterios potenciales a considerar en este tipo de análisis que coinciden con los planteados en la tabla anterior.

Como resultado de la tabla anterior se obtendrá un valor total de la suma de los valores asignados a cada criterio. El valor que se obtiene permitirá priorizar las diferentes medidas de adaptación propuestas, de tal manera que aquellas que tienen una valoración más alta son las que pueden/deben implementarse más fácilmente/rápidamente (IMT, 2019).

A continuación, se describirá el método de ACB como otra alternativa de priorización de medidas. Las diferencias más destacables es que el AMC puede incluir criterios que son difícilmente monetizables en un ACB y, además, abre un abanico de criterios mucho más matizados. No obstante, el ACB también puede incluir un amplio análisis de criterios estructurados en los pilares económicos, técnicos, sociales y ambientales dando un valor cuantitativo.

### 4.5.2.2 ANÁLISIS COSTE BENEFICIO<sup>7</sup> (ACB)

En el ACB se utiliza un proceso lógico y estructurado. El valor total cuantificable y no cuantificable de los beneficios deben compensar los costes para que un proyecto se considere rentable.

<sup>7</sup> Se toma como referencia para este apartado NASEM (2020)

En general, los ACB responden a la siguiente estructura:

1. En primer lugar se ha de definir el problema u oportunidad. En este caso, se trata de identificar la medida de adaptación más adecuada para mejorar la resiliencia frente al cambio climático de un activo o servicio.
2. En segundo lugar, se ha de precisar el alcance del estudio y las posibles suposiciones que haya que realizar. Así mismo se han de definir las alternativas que se van a evaluar.
3. En tercer lugar se ha de desarrollar una estimación de costes para cada alternativa, que debe incluir los costes cuantificables, ya sean directos o indirectos. Así mismo se ha de identificar los beneficios cuantificables y no cuantificables. Algunos beneficios son difíciles de cuantificar, pero contribuyen positivamente al proyecto general. Estos beneficios se incluyen en el análisis y se tendrán en cuenta en la toma de decisiones.
4. Por último se comparan las alternativas. En general, en un ACB el coste único es el económico, pero se podrían considerar otros criterios.

**Hay distintos tipos de ACB, pero el más completo es el denominado ACB de los tres pilares (Triple Bottom Line, TBL).** El análisis TBL evalúa una medida o estrategia en función de sus repercusiones económicas, ambientales y sociales combinadas:

- Las repercusiones económicas son los costes del ciclo de vida asociados con el proyecto.
- Las repercusiones ambientales son los efectos de un proyecto en el entorno, el hábitat o el clima circundantes.
- Las repercusiones sociales son los efectos de un proyecto en la comunidad más amplia, la calidad de vida o la sociedad.

Puede resultar de gran interés incluir el concepto de ciclo de vida en las repercusiones ambientales y sociales, no solo en las económicas.

Estos tres valores presentados juntos forman la evaluación TBL. Se pueden usar en el contexto de un ACB al cuantificar los valores monetarios asociados con cada uno en moneda constantes y sumarlos para medir el TBL total. Se pueden usar múltiples tasas de interés para reflejar los diferentes plazos asociados con los beneficios económicos, sociales y ambientales (soluciones basadas en la naturaleza).

Se debe tener en cuenta la dificultad de monetizar los costes y beneficios ambientales y sociales. Por lo general, los costes ambientales los determina un economista ambiental, ya que estos costes pueden variar ampliamente según el tipo de impacto y la ubicación geográfica.

Las fuentes de datos son extremadamente importantes para determinar la información de beneficios y costes. Algunos ejemplos son los siguientes:

- Registros históricos: hojas de trabajo de daños por desastres, registros de reparación, reclamaciones de seguros por inundaciones, artículos de noticias, etc.
- Estudios o proyectos relativos a la zona.
- Estudios ambientales.
- Estimaciones de coste a partir de software específico.
- Intensidad Media Diaria (IMD).
- Encuestas de tráfico.
- Otro tipo de encuestas

En todo caso, se hace notar que existen pocos estudios ACB que recojan los aspectos económicos, ambientales y sociales. Si bien puede ser una herramienta de gran utilidad y se debería fomentar su uso, estableciendo recomendaciones para efectuar los análisis.

### 4.5.3 IMPLEMENTACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL PLAN DE ADAPTACIÓN

Como último paso de esta fase y de la metodología estaría la implementación y seguimiento del Plan de Adaptación, consistente en integrar las medidas de resiliencia que se ha decidido aplicar frente al cambio climático en el diseño técnico del proyecto y en sus opciones de gestión. Para todo ello se ha de elaborar un **plan de acción** (ejecución y financiación) y un **plan de seguimiento** y respuesta, que incluiría un plan de revisión periódica de las hipótesis de la evaluación de la vulnerabilidad y los riesgos climáticos, entre otros. También es de gran relevancia la elaboración de un **plan de comunicación**. Es importante trasladar a la sociedad que la evaluación de la vulnerabilidad, los riesgos y la planificación de la adaptación tienen como objetivo reducir los riesgos climáticos restantes a un nivel aceptable.

El **PNACC 2021-2030** señala que las respuestas adaptativas difícilmente serán adecuadas y efectivas sin la implicación activa de aquellas personas y comunidades afectadas o capaces de aportar respuestas ante los riesgos identificados. En este sentido, el diseño de una evaluación de riesgos asociados al cambio climático debería plantearse como un proceso participativo que tenga en cuenta a personas expertas y partes interesadas (administraciones, comunidades locales, sector privado, organizaciones de la sociedad civil, academia...), incluyendo la consideración del conocimiento local y tradicional.

#### 4.5.3.1 PLAN DE ACCIÓN (EJECUCIÓN Y FINANCIACIÓN)

Un plan de adaptación deberá incluir:

- Esquema de trabajo: Descripción de las medidas que se va a implementar.
- Responsable: Organización y equipo que desarrollará el plan.
- Programa: Inicio, fechas de revisión y finalización de la acción o plan.
- Financiación: Los costes estimados y fuente de financiación.
- Prioridad: Posición del plan de adaptación en relación con otros planes.

Este mismo planteamiento se puede aplicar al nivel de las medidas del esquema de trabajo: Descripción de la medida concreta, responsable de la medida, programa de la medida, su financiación y la prioridad frente a otras medidas del plan de adaptación.

#### 4.5.3.2 PLAN DE SEGUIMIENTO

La adaptación al cambio climático es un proceso iterativo que requiere seguimiento continuo en el tiempo, evaluando los esfuerzos de la adaptación, con la mirada puesta en la mejora del conocimiento de los riesgos climáticos y la disminución de la incertidumbre de los escenarios climáticos (IMT, 2019). Con la nueva información disponible la autoridad competente debe reevaluar la vulnerabilidad y el riesgo de los activos y servicios analizados inicialmente, para seguir mejorando la resiliencia.

El seguimiento debe garantizar que la acción implementada tiene el efecto deseado. Para ello se requiere establecer un plan de seguimiento, los indicadores, la periodicidad del muestreo, el método de seguimiento, entre otros aspectos. (IMT, 2019).

Los indicadores que se recojan en el plan de seguimiento tienen que ser significativos de la medida o conjunto de medidas implementadas. Al tratarse de un tema complejo y que requiere un análisis pormenorizado, se debería efectuar un trabajo complementario a este marco metodológico.

### **4.5.3.3 PLAN DE COMUNICACIÓN (INFORMACIÓN, SENSIBILIZACIÓN Y FORMACIÓN)**

El plan de comunicación permite que las administraciones de carretera y empresas concesionarias difundan información sólida y accesible sobre los diferentes aspectos relacionados con la adaptación de las infraestructuras al cambio climático. Es muy importante transmitir esta información como primer paso de concienciación y para aumentar el conocimiento en este tema.

Un aspecto muy importante se refiere a la existencia de protocolos que definan el papel a desempeñar por los distintos agentes en caso de que produzca un impacto en la infraestructura por amenazas vinculadas al cambio climático (lluvias intensas en cortos periodos de tiempo, nevadas, etc.). Los protocolos establecidos para los diferentes eventos deben ser parte del plan de acción.

Para que los protocolos se implementen de forma correcta es muy importante la adecuada formación de cada uno de los elementos que intervienen, de forma que todos conozcan e interioricen cuál es el papel a desempeñar en caso de producirse eventos que provoquen un daño en un activo con pérdida de servicio. Dicha formación, que se debe producir en todos los niveles, ha de fomentarse y ser actualizada periódicamente.

Como resultado de esta etapa de implementación y seguimiento se dispondrá de un plan completo y organizado en el tiempo para mejorar la resiliencia de la red, a través de la mejora de los activos o servicios en riesgo.

# **5. CASO PRÁCTICO. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A UN ESTUDIO EN DOS DESMONTES EN CANTABRIA**



## 5. CASO PRÁCTICO. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A UN ESTUDIO EN DOS DESMONTES EN CANTABRIA

La región de Cantabria está situada en el norte de España y cuenta con una población de 585.222 habitantes (censo 2022). Se trata de una región costera que a su vez presenta un relieve montañoso debido a la presencia de la Cordillera Cantábrica. Esta orografía le confiere una importante variabilidad climática, que va desde el clima oceánico templado que se presenta en la zona costera, hasta el clima mediterráneo cálido-veraniego que aparece hacia el interior.

El Gobierno de España cuenta con 600 km de carreteras estratégicas en esta región, que dan acceso a los principales servicios sanitarios, turísticos y comerciales, que gestiona a través de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA).

La conexión de Cantabria con la Meseta, la zona central y el sur de España se ha realizado históricamente por medio de dos carreteras: la N-611 de Palencia a Santander y la N-623 de Burgos a Santander. Como consecuencia de los grandes volúmenes de tráfico generados en el tramo final de la N-611, entre Torrelavega y Santander (más de 60.000 vehículos/día), los dos principales núcleos de población de Cantabria, en los años 80 se acometió la construcción de una vía de altas prestaciones, la Autopista A-67 Santander-Torrelavega, concluida en 1990. Esta vía se prolongó hasta Palencia bajo la nueva denominación de Autovía A-67 con año de finalización en el 2008.

En este marco, la A-67 constituye la principal conexión de la Comunidad Autónoma de Cantabria con la Meseta, y desde allí con la zona centro y sur peninsular, cumpliendo adicionalmente una importantísima función de accesibilidad en toda la región a la que da servicio.

El caso de estudio del activo denominado Desmonte\_A67\_km175 se encuentra en el tramo Torrelavega-Los Corrales de Buelna Norte que se inauguró en el año 2000. Supone la duplicación de la variante de Torrelavega, y es de destacar que se encuentra entre el túnel de las Caldas de Besaya y el viaducto sobre la carretera Cartes-Villanueva de la Peña en una orografía accidentada con pendientes del 8%.

Mientras, el caso de estudio del activo denominado Desmonte\_N623\_km117, se encuentra en el municipio de Entrambasmeas de la N-623, y aunque la orografía en esta carretera es accidentada, en este tramo la carretera discurre paralela entre el río Pas y laderas con fuertes pendientes transversales, con pendiente longitudinal de la carretera baja, teniendo un tráfico más local.

En estas carreteras las precipitaciones intensas por tormentas provocan, en algunas zonas, inestabilidad de taludes o laderas consecuencia de la saturación del suelo, con deslizamientos de tierra de taludes o laderas; así como desprendimientos de rocas en zonas fracturadas, que pueden llevar al posible cierre total o parcial de la circulación.

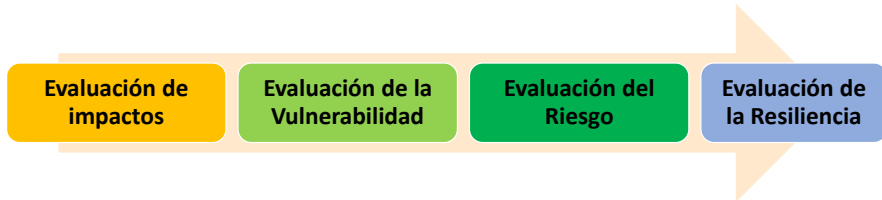
Haciendo un análisis de los posibles impactos que pueden producirse por la precipitación se pueden destacar los siguientes:

- Afeción a la circulación por precipitaciones intensas. Puede llegar a producirse una interrupción del tráfico.
- Desprendimiento de rocas y/o tierra del talud. Este hecho podría tener una especial incidencia en terrenos kársticos.
- Deslizamiento traslacional o rotacional (profundo).
- Deslizamiento superficial del talud.
- Asiento y vuelco de muros de contención.
- Asiento del terraplén debido a hundimiento por fallo en la cimentación o colapso del cuerpo del terraplén. Conlleva una deformación y/o rotura parcial o total del firme.



- Disminución de la seguridad de la vía por acumulación de agua en el pavimento debido a precipitaciones intensas.
- Incremento de problemas de socavación. Afectaría a pilas y estribos de obras de paso.

Se plantea un estudio cuyos objetivos y alcance quedan descritos en lo recogido como relato, en el que se implementa la metodología con las fases descritas anteriormente.



## 5.1 EVALUACIÓN DE IMPACTOS (FASE 1). INCLUYE LOS ASPECTOS PREVIOS

### 5.1.1 OBJETIVOS Y ALCANCE. RELATO

La precipitación máxima en 24 horas (amenaza) provoca el desprendimiento de rocas y/o tierra (impacto) en dos desmontes de carretera (activo) en Cantabria en la A-67 [A67-km175] y N-623 [N623-km117] (exposición), afectando a sus características físicas (sensibilidad), que se puede producir cada 2 años (probabilidad), provocando pérdidas económicas, ambientales y sociales (gravedad) con efectos en las poblaciones próximas (críticidad).

Este análisis se realiza para la actualidad (periodo 1971-2000) y para las proyecciones a futuro (periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 del AR5 del IPCC.

## 5.2 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD (FASE 2)

Combinación de Exposición y Sensibilidad. Depende de las características internas del activo.

### 5.2.1 EXPOSICIÓN

La evaluación de la **exposición** consiste en determinar en qué grado los desmontes objeto de estudio se ven afectados por la precipitación máxima en 24 horas.

Contamos con los **activos** georreferenciados como se ve en la Figura 6.

## CASO PRÁCTICO

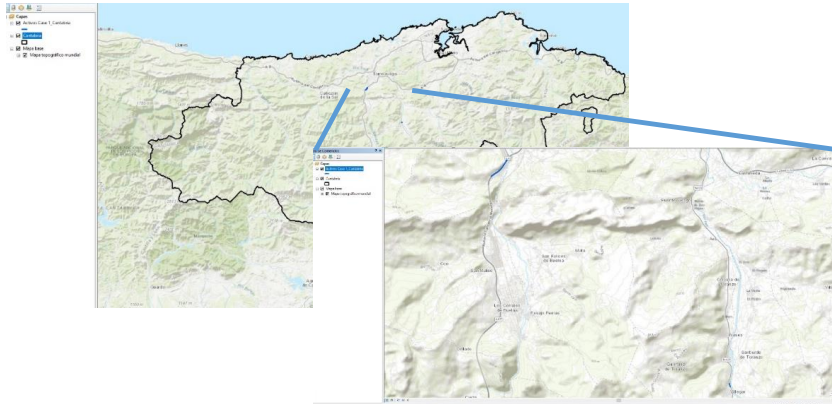


Figura 6. Situación de los activos estudiados

Posteriormente se obtiene el mapa de amenazas para el periodo actual, que en el caso de la precipitación máxima en 24 horas se descarga del Visor de Escenarios de Cambio Climático de AdapteCCa (Histórico, 1971-2000).

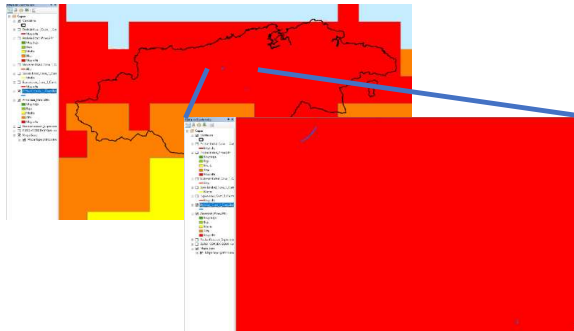


Figura 7. Mapa de amenaza de Precipitación Máxima en 24h y posición de los activos estudiados

Para generar el mapa de amenazas se han de establecer unos umbrales que dependen de cada variable, índice climático o amenaza y de cada territorio. Estos umbrales vendrán marcados por la experiencia documentada y debidamente registrada y deberán ser coherentes con la zona de estudio. En este caso práctico los datos para establecer los umbrales se han obtenido de la Demarcación de Carreteras del Estado en Cantabria. Se parte de los eventos en los que se ha producido un impacto en la zona de estudio y de las PMax24h obtenidas de las estaciones más próximas a la zona donde se han producido los eventos.

En base a estos umbrales se establecen cinco categorías de amenaza (Muy Baja (1), Baja (2), Media (3), Alta (4) y Muy Alta (5)) que al cruzarse con la posición de los activos nos darán la exposición de los mismos en nuestro estudio.

Tabla 9. Matriz de exposición (amenaza) Precipitación Máxima 24h (mm/día)

Exposición	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
PMax24h (mm/día)	< 25	25-30	30-40	40-60	> 60

Como se puede observar en la Figura 8 la **exposición** para el periodo actual (Histórico, 1971-2000) para nuestros dos activos es **Muy Alta (5)**.

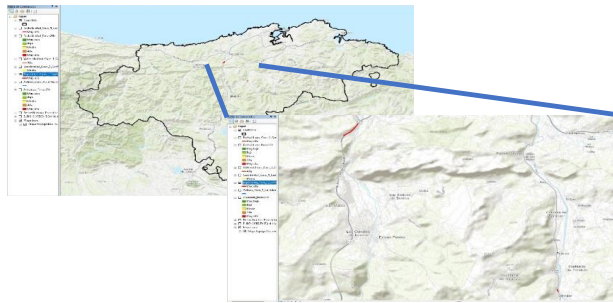


Figura 8. Exposición de los activos estudiados

Para el estudio de la exposición en el futuro es necesario calcular el resto de mapas de amenaza para los periodos correspondientes de los diferentes escenarios.

### 5.2.2 SENSIBILIDAD

Para evaluar la sensibilidad de los activos estudiados se utiliza la matriz de sensibilidad correspondiente al activo desmontes. Concretamente se analiza el impacto **Desprendimiento de rocas del talud** respecto a la **precipitación máxima en 24 horas**.

En la tabla siguiente se recogen los factores de sensibilidad analizados por cada activo que se ven afectados por este impacto con la ponderación indicada. También se señala el nivel de sensibilidad de cada uno de estos factores con la descripción correspondiente:

Tabla 10. Matriz de Sensibilidad completada para los activos estudiados

Factor de Sensibilidad	Ponderación	1. A67-km175		2. N623-km117	
		Nivel de Sensibilidad	Descripción	Nivel de Sensibilidad	Descripción
Ángulo de inclinación	15%	4	Muy fuerte (50 a 60°)	5	Vertical o sub-vertical (más de 60°)
Altura del terraplén	5%	3	La altura es mayor a 6 metros y hasta 10 metros	3	La altura es mayor a 6 metros y hasta 10 metros
Tipología de material del desmonte (no aplica a desmontes en rocas)	20%	1	Material muy poco propenso a la erosión y deslizamiento (pedraplén o roca)	1	Material muy poco propenso a la erosión y deslizamiento (pedraplén o roca)
Tratamiento de mejora (mallas, gunitado, u otras)	20%	2	El desmonte presenta más del 50% y hasta un 75%	2	El desmonte presenta más del 50% y hasta un 75%
Grado de meteorización o disgregación (desmonte en roca)	30%	5	El desmonte presenta desprendimientos mayores a 1,50 metros y presencia de escombros. Se requiere mantenimiento mayor del corte	5	El desmonte presenta desprendimientos mayores a 1,50 metros y presencia de escombros. Se requiere mantenimiento mayor del corte

## CASO PRÁCTICO

		1. A67-km175		2. N623-km117	
Factor de Sensibilidad	Ponderación	Nivel de Sensibilidad	Descripción	Nivel de Sensibilidad	Descripción
Cuneta de pie (distancia del talud a la plataforma)	10%	3	Entre 1 y 3 metros	4	Menos de 1 metro
TOTAL	100%	Media (3)		Media (3)	

Como se puede observar en la Figura 9 la **sensibilidad** para nuestros dos activos es **Media (3)**. Atendiendo a un mantenimiento adecuado del activo se ha supuesto que su sensibilidad no varía a lo largo de los periodos (futuro cercano, 2011 – 2040, futuro medio, 2041-2070 y futuro lejano, 2071-2100), incluidos en los escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y 8.5).

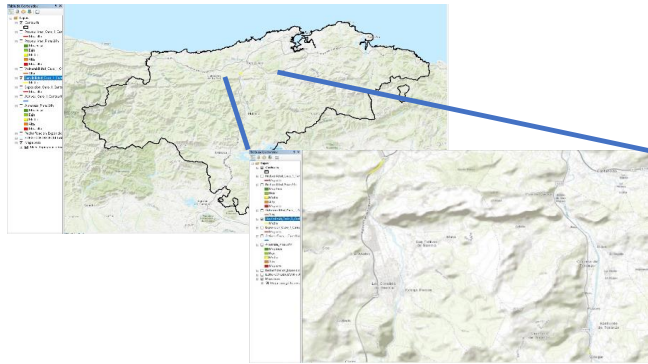


Figura 9. Sensibilidad de los activos

### 5.2.3 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Para evaluar la vulnerabilidad de los activos estudiados se emplea la siguiente expresión:

$$\text{Vulnerabilidad} = \text{Exposición} \times \text{Sensibilidad}$$

Los valores que se adoptan para cada uno de los niveles de vulnerabilidad son los que se muestran en la siguiente figura 10:

		Exposición				
		Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Sensibilidad	Muy Baja	1	2E	3E	4E	5E
	Baja	2S	4	6E	8E	10E
	Media	3S	6S	9	12E	15E
	Alta	4S	8S	12S	16	20E
	Muy Alta	5S	10S	15S	20S	25

Vulnerabilidad	Rangos de Vulnerabilidad (Exposición x Sensibilidad)
Muy Baja	1-3
Baja	4-6
Media	7-10
Alta	12-16
Muy Alta	17-25

Figura 10. Matriz de Vulnerabilidad. Rangos en base a Exposición y Sensibilidad

Se debe tener en cuenta que la letra que acompaña al valor de la vulnerabilidad indica si el mayor peso viene del lado de la exposición o de la sensibilidad. En los casos en que no aparece ninguna letra la exposición y la sensibilidad tendrán el mismo peso.

Por tanto, los resultados que se obtienen para nuestros dos activos son:

Tabla 11. Nivel de Vulnerabilidad por activo

Activo	Exposición	Sensibilidad	Vulnerabilidad
1. A67-km175	5	3	15E (Alta, 4)
2. N623-km117	5	3	15E (Alta, 4)

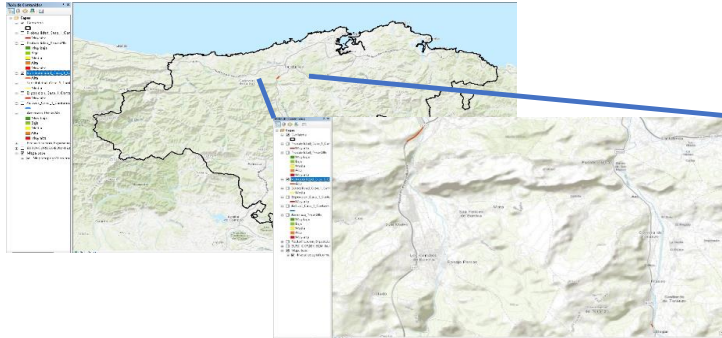


Figura 11. Vulnerabilidad de los activos

Como se puede observar en la Tabla 11 y en la Figura 11 la **vulnerabilidad** actual para nuestros dos activos es **Alta (4)**, teniendo un mayor peso la exposición frente a la sensibilidad. Para conocer los efectos del cambio climático en la vulnerabilidad de los activos hay que realizar este mismo ejercicio para los periodos y escenarios señalados anteriormente.

### 5.3 EVALUACIÓN DEL RIESGO (FASE 3)

Combinación de Probabilidad y Gravedad. Depende de las características de la amenaza.

#### 5.3.1 PROBABILIDAD

Para la evaluación de la probabilidad, en este caso recurrimos al cálculo de **periodos de retorno**. Los periodos de retorno son una técnica usada comúnmente para representar un estimativo de la probabilidad de ocurrencia de un evento concreto en un periodo determinado.

Se toma la precipitación máxima en 24 horas para las siguientes estaciones como referencia, ya que son las más cercanas a los activos estudiados **para el periodo actual**:

1. A67-km175, estación 1124A (Datos desde 1990 hasta 2021)
2. N623-km117, estación 1154H (Datos desde 1994 hasta 2021). Faltan años 1999 y 2000

Estos datos se sometieron a un análisis estadístico por Gumbel para cada una de las estaciones para obtener la PMax24h para siete periodos de retorno, definidos así para ligarlos a una escala de clasificación del riesgo. Mediante estos datos y utilizando el método de interpolación IDW (Ponderación de distancia inversa) del Sistema de Información Geográfica QGIS, se obtuvo un valor único de PMax24h por periodo de retorno para la zona de estudio en la que se encuentran situados los dos activos analizados en el caso piloto (Ver Tabla 12).

## CASO PRÁCTICO

Tabla 12. Determinación de Periodos de Retorno de PMax24h por estaciones mediante Gumbel. Valor de referencia interpolado a nivel de territorio donde se encuentran los activos

Periodo de Retorno (T)	Estación 1154H	Estación 1124A	PMax24h referencia (mm)
2	63,4147	78,3875	76,0497
5	77,3032	100,4764	96,8579
10	86,4987	115,1012	110,6351
25	98,1172	133,5796	128,0430
50	106,7364	147,2879	140,9564
100	115,2920	160,8950	153,7747
500	135,0627	192,3390	183,3961

En base a estos datos se proponen las siguientes categorías de probabilidad de ocurrencia del impacto (Tabla 13) definido como desprendimiento de rocas y/o tierra del talud debido a la amenaza de PMax24h. Para este ejercicio se tienen en cuenta los umbrales de precipitación utilizados en la matriz de exposición a partir de los cuales se produce el evento y el periodo de retorno de las precipitaciones en la zona de estudio (probabilidad de la amenaza).

Tabla 13. Matriz de Probabilidad de ocurrencia del impacto por PMax24h (mm/día).

Probabilidad	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
PMax24h (mm/día)	< 25	25-30	30-40	40-60	> 60

En este caso, como el valor de PMax24h para el periodo de retorno de 2 años es superior a la precipitación a la que se suele producir el impacto analizado, se establece que la probabilidad a la que se produce el impacto es muy alta (Ver Tabla 13).

Para dibujar el mapa de probabilidad se utilizan los periodos de retorno que sirven para establecer los umbrales. Por otro lado, los valores de PMax24h correspondientes al periodo histórico (1971-2000), que se obtienen de AdapteCCa, se utilizan para saber si en la zona de estudio en la que se puede producir el impacto se superan esos umbrales.

Para los periodos futuros descritos en los escenarios de cambio climático se tienen que calcular sus correspondientes probabilidades de amenaza, con la dificultad que eso conlleva debido a la incertidumbre asociada a los modelos climáticos. Para la determinación de los impactos en los periodos y escenarios futuros se emplearán los mismos umbrales que en el periodo actual.

En la Figura 12 se puede observar que la **probabilidad de ocurrencia del impacto** para nuestros dos activos es **Muy Alta (5)**.

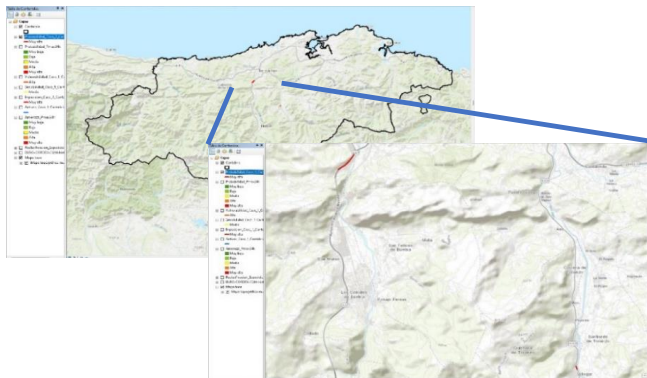


Figura 12. Probabilidad de ocurrencia del impacto en los activos estudiados

### 5.3.2 GRAVEDAD

Para evaluar la gravedad de los activos estudiados se utiliza la matriz de gravedad con sus factores asociados. En la Tabla 14 y Tabla 15 se detalla el nivel de gravedad de cada uno de los dos activos estudiados. Se considera que cada uno de los factores de gravedad tienen el mismo peso en el resultado final.

Tabla 14. Análisis de gravedad utilizando la matriz de gravedad del activo A67-km175

	Escala	Muy baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy alta (5)
Código Factor	Factor de Gravedad	Consecuencias				
1	Población afectada	Menos del 1% de la población a la que da servicio la infraestructura	Entre el 1-2% de la población a la que da servicio la infraestructura	Entre el 2-5% de la población a la que da servicio la infraestructura	Entre el 5-10% de la población a la que da servicio la infraestructura	Más del 10% de la población a la que da servicio la infraestructura
2	Coste de la intervención (reparación o reconstrucción)	Menos de 1M€	Entre 1M€ y 2M€	Entre 2M€ y 5M€	Entre 5M€ y 10M€	Mas de 10M€
3	Tráfico afectado (IMD)	<2.000	2.001-7.500	7.501 – 15.000	15.001 – 25.000	>25.000
4	Tráfico de vehículos pesados afectado (% de la IMD)	<5%	6-10%	11-20%	21-30%	>30%
5	Tipo de vía	Camino Rural	Carretera local/comarcal	Carretera convencional	Carretera multicarril	Autovía/Autopista
6	Acceso a servicios básicos (Opciones Alternativas de acceso) Especial atención a grupos vulnerables	No afección a servicios básicos		Afección a servicios básicos, pero existen itinerarios alternativos		Afección a servicios básicos sin alternativa

CASO PRÁCTICO

	Escala	Muy baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy alta (5)
Código Factor	Factor de Gravedad	Consecuencias				
7	Economía y Empleo	Afección puntual a negocios y empleos		Afección media a negocios y empleos		Afección a todos los negocios y empleos
<b>TOTAL Gravedad = (5+1+3+2+5+3+5)/7 = 3</b>						<b>MEDIA</b>

Tabla 15. Análisis de gravedad utilizando la matriz de gravedad del activo N623-km117

	Escala	Muy baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy alta (5)
Código Factor	Factor de Gravedad	Consecuencias				
1	Población afectada	Menos del 1% de la población a la que da servicio la infraestructura	Entre el 1-2% de la población a la que da servicio la infraestructura	Entre el 2-5% de la población a la que da servicio la infraestructura	Entre el 5-10% de la población a la que da servicio la infraestructura	Más del 10% de la población a la que da servicio la infraestructura
2	Coste de la intervención (reparación o reconstrucción)	Menos de 1M€	Entre 1M€ y 2M€	Entre 2M€ y 5M€	Entre 5M€ y 10M€	Mas de 10M€
3	Tráfico afectado (IMD)	<2.000	2.001-7.500	7.501 – 15.000	15.001 – 25.000	>25.000
4	Tráfico de vehículos pesados afectado (% de la IMD)	<5%	6-10%	11-20%	21-30%	>30%
5	Tipo de vía	Camino Rural	Carretera local/comarcal	Carretera Convencional	Carretera multicarril	Autovía/Autopista
6	Acceso a servicios básicos (Opciones alternativas de acceso) Especial atención a grupos vulnerables	No afección a servicios básicos		Afección a servicios básicos, pero existen itinerarios alternativos	4	Afección a servicios básicos sin alternativa
7	Economía y Empleo	Afección puntual a negocios y empleos		Afección media a negocios y empleos		Afección a todos los negocios y empleos
<b>TOTAL Gravedad = (3+1+2+1+3+4+3)/7 = 2</b>						<b>BAJA</b>

En la Figura 13 se puede observar que la **gravedad asociada** al activo A67-km175 es **Media (3)** y **Baja (2)** para el activo N623-km117.



## METODOLOGÍA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CARRETERAS

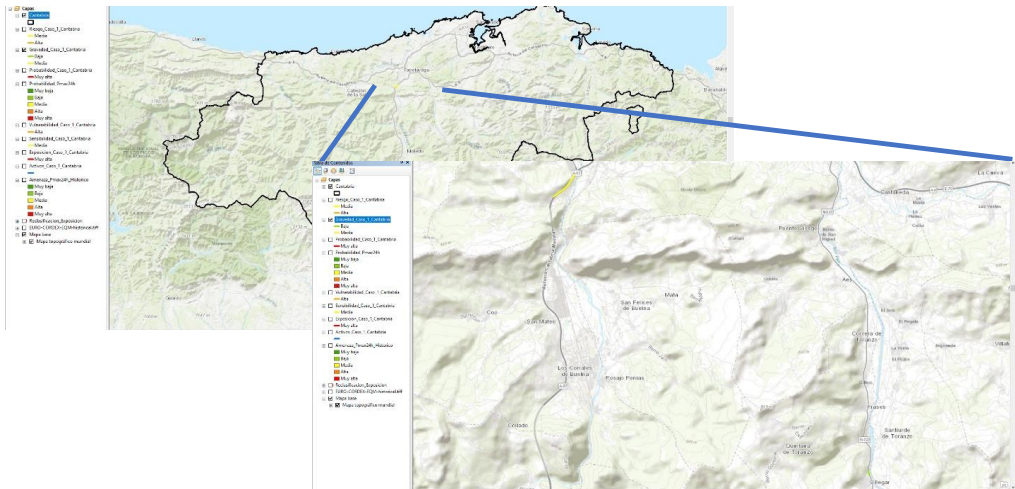


Figura 13. Gravedad del impacto asociada a los activos estudiados

### 5.3.3 EVALUACIÓN DEL RIESGO

Para evaluar el riesgo de los activos estudiados se emplea la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Gravedad}$$

Los valores que se adoptan para cada uno de los niveles de Riesgo son los que muestran la siguiente figura:

		Probabilidad				
		Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Gravedad	Muy Baja	1	2P	3P	4P	5P
	Baja	2G	4	6P	8P	10P
	Media	3	3G	6G	9	12P
	Alta	4	4G	8G	12G	16
	Muy Alta	5	5G	10G	15G	20G

Riesgo	Rangos de Riesgo (Probabilidad x Gravedad)
Muy Bajo	1-3
Bajo	4-6
Medio	7-10
Alto	12-16
Muy Alto	17-25

Figura 14. Matriz de Riesgo. Rangos en base a Probabilidad y Gravedad

Se debe tener en cuenta que la letra que acompaña al valor del riesgo indica si el mayor peso viene del lado de la probabilidad o de la gravedad. En los casos en que no aparece ninguna letra la probabilidad y la gravedad tendrán el mismo peso.

Por tanto, los resultados que se obtienen para nuestros dos activos son:

Tabla 16. Nivel de Riesgo por activo

Activo	Probabilidad	Gravedad	Riesgo
1. A67-km175	5	3	15P (Alto, 4)
2. N623-km117	5	2	10P (Medio, 3)

## CASO PRÁCTICO

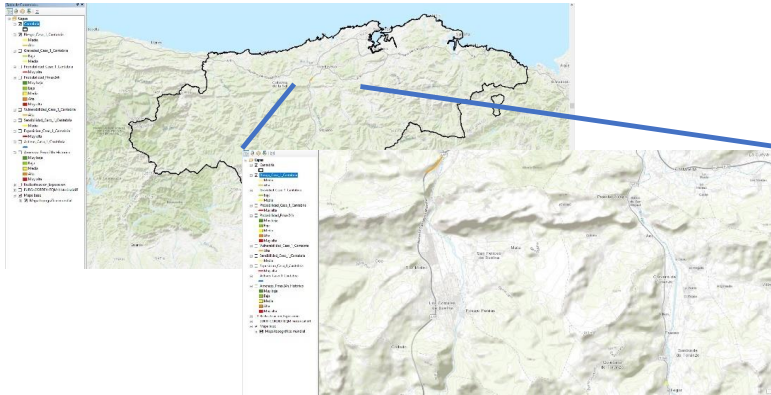


Figura 15. Riesgo de los activos

Como se puede observar en la Tabla 16 y en la Figura 15 el **Riesgo** actual es Alto (4) para el activo A67-km175 y medio para el activo N623-km117, teniendo un mayor peso en ambos casos la probabilidad frente a la gravedad. Para conocer los efectos del cambio climático en la vulnerabilidad de los activos hay que realizar este mismo ejercicio para los periodos futuros y escenarios señalados anteriormente.

El siguiente paso para completar un análisis de adaptación al cambio climático de una infraestructura de carretera es desarrollar un plan de adaptación como parte de la Fase de Resiliencia, incluyendo un ACB para la priorización de medidas y un plan de comunicación, entre otros. En siguientes revisiones de la metodología se incluirán estos avances en este caso práctico

## 6. CONCLUSIONES



## 6. CONCLUSIONES

Ante los posibles impactos por acción del clima, tanto los actuales como los derivados del cambio climático, es preciso analizar y reflexionar en torno al diseño, la construcción y la explotación de infraestructuras de transporte; en este caso, las carreteras. Se trata de identificar y cuantificar las amenazas más importantes, los elementos más vulnerables y los riesgos esperables, con el objetivo de proponer medidas de adaptación para minimizar esos posibles impactos, garantizando - en la medida de lo posible- la movilidad de las personas y las mercancías. Para ello, es esencial, en primera instancia, disponer de una metodología sencilla y práctica que ayude en la realización de los análisis que es preciso efectuar para determinar las necesidades de adaptación de una red de carreteras, u otras infraestructuras, al cambio climático. Esta es la forma de llegar a resultados que sean comparables entre demarcaciones, entre distintas administraciones de carreteras y otros gestores de infraestructuras. Así mismo, hace falta dar otros pasos para continuar avanzando hacia una red más resiliente.

Es por ello por lo que esta metodología pretende normalizar unas definiciones en todo el proceso de gestión de riesgos para que las distintas administraciones de carreteras y operadores tengan claro, en todo momento, de qué se está hablando en cada etapa de análisis de la vulnerabilidad, del riesgo y de la resiliencia. Así mismo, da pautas (en forma de matrices y tablas) para objetivar y armonizar los distintos análisis que es preciso llevar a cabo para evaluar los riesgos derivados del cambio climático sobre distintos activos.

Implementar esta metodología exige que los gestores de carreteras y de otros modos de transporte dispongan de unas bases de datos perfectamente documentadas de los eventos climáticos, con fechas, características, etc. y efectos provocados, de manera que, conociendo lo que ha sucedido en el pasado, se pueda proyectar el futuro. Esta metodología podría ser extrapolable a otros modos de transporte teniendo en cuenta nuevas amenazas o variables climáticas que puedan afectar a otro tipo de activos diferentes a los señalados en este documento, para los que habría que elaborar las matrices de sensibilidad correspondientes.

La información disponible en las carreteras y en otros modos de transporte sobre los eventos e impactos asociados al cambio climático debería estar organizada dentro del territorio español. Esto conlleva:

- Facilitar el acceso a la información climática.
- Desarrollo de inventarios de los activos con información relevante desde el punto de vista de la valoración de su sensibilidad.
- La caracterización del histórico de eventos sucedidos con sus correspondientes impactos, en los diferentes modos de transporte, y para distintos activos.
- Describir con precisión los costes sociales, ambientales y económicos asociados a cada evento climático.

Para muchas de las amenazas o variables climáticas que producen impactos en los activos o servicios existe todavía una gran incertidumbre para los periodos futuros establecidos en cada uno de los escenarios que se pronostican como consecuencia del cambio climático. En este ámbito de falta de conocimiento, la torrencialidad es uno de los índices climáticos que quedan por estudiar en mayor profundidad, aunque se ha hecho un esfuerzo en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX por conocer la variabilidad de las precipitaciones (1, 3, 6 y 12 horas) en relación a un periodo de control. Conocer cómo va a afectar la torrencialidad es determinante para gestionar mejor los riesgos de inundación y la estabilidad de los taludes, entre otras afecciones.

En cualquier caso, es preferible un conocimiento imperfecto a un desconocimiento total. Las evaluaciones, aunque tengan limitaciones debidas a la incertidumbre, permiten reducir y acotar la propia incertidumbre (FB\_OECC, 2023). PIARC en su última revisión (PIARC, 2023)

apoya esta forma de proceder, aproximándose a la realidad, aunque todas las fases metodológicas no estén completas. En ese sentido, propone un nuevo marco metodológico que sea flexible, de forma que sea aplicable por cualquier gestor de carreteras en cualquier país, customizándolo en función de su grado de desarrollo, conocimiento, disponibilidad de recursos, etc.

No contemplar la incertidumbre puede conllevar una mayor probabilidad de mala adaptación, aumentando así la probabilidad de que las medidas adoptadas no sean adecuadas o incluso aumenten el riesgo a la postre.

Por último, el Plan de Adaptación es el resultado de la Fase de Resiliencia, que conlleva la descripción pormenorizada de medidas a implementar, entre las que se pueden destacar los sistemas de alerta temprana y los protocolos de actuación de emergencia con intervención rápida. Para mejorar estos sistemas se deben implementar métodos avanzados como la monitorización del estado de la infraestructura con big data, sensores remotos y vigilancia con drones. Una parte importante del Plan de Adaptación es la comunicación, sensibilización y formación para que la sociedad en su conjunto sea partícipe de este proceso de toma de decisiones.

Se trata, en definitiva, de avanzar como sociedad hacia la implementación de formas de trabajar más responsables con el clima, tanto en la parte de adaptación como en la parte de mitigación.

Como siguientes pasos, sería deseable continuar trabajando en la aplicación de esta metodología, para recabar más datos que permitan aproximarnos de mejor manera a la problemática (tanto en la parte de exposición, como en la de sensibilidad, gravedad y probabilidad, especialmente). Con todo ello, se podrá reformular la metodología y mejorar la capacidad adaptativa de la red.

## **7. BIBLIOGRAFÍA**

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Albarrán Guerra, P. (2013). Riesgos naturales de origen geomorfológico en Cantabria. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Cantabria.
- Alonso, M. L., Parra, L., Jiménez, F. y Crespo, L. Hacia una red de carreteras española más resiliente. *Revista Routes/Roads*, 393/Calgary 2022.
- CEDEX et al (2013). Grupo de Trabajo para el análisis de las necesidades de adaptación al cambio climático de la red troncal de infraestructuras de transporte en España (2013). Informe final.
- CEDEX (2018). Secciones de la red estatal de infraestructuras de transporte terrestre potencialmente más expuestas por razón de la variabilidad y cambio climáticos. Informe Final. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)
- Disponible en: [https://www.adaptecca.es/sites/default/files/documentos/accit\\_informe\\_final\\_cedex.pdf](https://www.adaptecca.es/sites/default/files/documentos/accit_informe_final_cedex.pdf)
- CEDEX (2021). Impacto del cambio climático en las precipitaciones máximas en España. Informe. Disponible en: [https://ceh.cedex.es/web\\_ceh\\_2018/Imp\\_CClimatico\\_Pmax.htm](https://ceh.cedex.es/web_ceh_2018/Imp_CClimatico_Pmax.htm); [https://ceh.cedex.es/web\\_ceh\\_2018/documentos/Imp\\_CClimatico\\_Pmax/Informe\\_Impacto\\_Cambio\\_Climatico\\_Pmax\\_40-617-5-001.pdf](https://ceh.cedex.es/web_ceh_2018/documentos/Imp_CClimatico_Pmax/Informe_Impacto_Cambio_Climatico_Pmax_40-617-5-001.pdf)
- Crespo, L. y Jiménez, F. (2020). Metodología de análisis de adaptación al cambio climático de infraestructuras de transporte. *Revista Ingeniería Civil*, 197/2020: p. 118-129.
- Corominas, J. (2007). El clima y sus consecuencias sobre la actividad de los movimientos de ladera en España. *Revista C&G*, 20 (3-4), 89-113.
- EC (2013). Guidelines for Project Managers: Making vulnerable investments climate resilient. European Commission (EC).
- EC (2021). Commission Notice. Technical guidance on the climate proofing of infrastructure in the period 2021-2027. European Commission (EC).
- FB\_OECC (2023, por publicar) Guía para el análisis de riesgos asociados al cambio climático. Fundación Biodiversidad junto a la Oficina Española de Cambio Climático (OECC), a través de una asistencia técnica de TECNALIA.
- FWHA (2018). Vulnerability Assessment and Adaptation Framework. 3rd Edition. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation.
- Grupo de Trabajo ATC-PIARC (2023). ¿De qué hablamos cuando hablamos de evaluación de la evolución del cambio climático en carreteras? *Revista RUTAS*. N° 193. Asociación Técnica de Carreteras (ATC). [ATC Asociación Técnica de Carreteras \(atc-piarc.com\)](https://www.atc-piarc.com)
- IMT (2017) Panorama internacional de la adaptación de la infraestructura carretera ante el cambio climático. Instituto Mexicano del Transporte (IMT).
- IMT (2019) Marco Metodológico para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático en México. Instituto Mexicano del Transporte (IMT).
- ISO (2019). ISO 14090:2019. Adaptación al cambio climático — Principios, requisitos y directrices. International Organization for Standardization (ISO).
- JASPERS (2017). JASPERS Guidance Note - The Basics of Climate Change Adaptation Vulnerability and Risk Assessment.
- López Oliver, D., Pertierra Rodríguez, M., Paniagua Serrano, I., Martín-Caro, J.A., Arias Hofman, G. y Pacios Pienso, A (2022). Mejora de la resiliencia de la infraestructura de transporte mediante el desarrollo de herramientas de gestión del riesgo frente a desastres naturales. PIARC. XVI Congreso Mundial de Vialidad Invernal y Resiliencia de la Carretera. Calgary.
- PIARC (2016) Marco internacional para la adaptación de la infraestructura de carreteras ante el Cambio Climático. Asociación Mundial de Carretera (PIARC).
- PIARC (2019a) Refinamiento del marco internacional de la PIARC para la adaptación al Cambio Climático de la infraestructura carretera. Asociación Mundial de Carretera (PIARC).
- PIARC (2019b) Metodologías y estrategias de adaptación para aumentar la resiliencia de las carreteras al Cambio Climático. Enfoque de Caso de Estudio. Asociación Mundial de Carretera (PIARC).
- PIARC (2023). PIARC International climate change adaptation framework. TECHNICAL COMMITTEE 1.4. Climate Change and Resilience of Road Networks.
- NASEM (2020). Incorporating the Costs and Benefits of Adaptation Measures in Preparation for Extreme Weather Events and Climate Change Guidebook. National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press.
- Disponible en: <https://doi.org/10.17226/25744>

# **ANEJOS**



## ANEJOS

# ANEJO 1. MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE OBRAS DE TIERRA: DESMONTE Y TERRAPLÉN

## OBRAS DE TIERRA. DESMONTE

### Identificación preliminar de impactos

La metodología propuesta plantea basar la evaluación de impactos del cambio climático sobre la infraestructura en el estudio de los posibles modos de fallo de cada elemento de esta. Es decir, se trataría de identificar los modos de fallo más frecuentes y evaluar si el cambio de las condiciones climáticas podría tener alguna influencia en dichos modos de fallo. Una vez realizado este ejercicio, se filtraría en función de las amenazas climáticas esperadas en la zona de estudio (aumento de precipitaciones, aumento de temperatura...) y en base a los fallos más relevantes, según datos históricos y el conocimiento de los gestores correspondientes.

Siguiendo este proceso, se presentan a continuación los principales impactos que pueden afectar a un desmonte, asociados a los posibles modos de fallo ante diversas amenazas climáticas.

Tipo de impacto	Código	Nombre del impacto	Procesos relacionados
Geotécnico	G1	Desprendimiento de rocas y/o tierra del talud	Fracturación del talud rocoso. Presencia de agua. Ciclos hielo deshielo en las fisuras. Condiciones geomorfológicas
	G2	Vuelco o toppling	Fracturación del talud rocoso. Presencia de agua. Ciclos hielo deshielo en las fisuras. Condiciones geomorfológicas
	G3	Deslizamiento traslacional o rotacional (profundo)	Ángulo de inclinación y altura del desmonte, ángulo de rozamiento interno, cohesión del suelo, resistencia al corte; ciclos humedad sequedad, precipitación intensa y precipitación acumulada en varios días; condiciones geomorfológicas
	G4	Deslizamiento superficial del talud	Meteorización superficial, presencia o no de vegetación, fallo en el drenaje de coronación del desmonte (cuneta de guarda); ciclos humedad sequedad, precipitación intensa y precipitación acumulada en varios días
	G5	Torrenteras	Existencia de cauces en la ladera o en el propio desmonte debido a precipitaciones intensas

### Identificación de amenazas relacionadas

*Nota: Siempre que sea posible se tendrán en cuenta las proyecciones de las variables con signadas como amenazas, tal y como se explica con detalle en el cuerpo de la metodología.*

Amenaza/variable/índice impacto	Precipitación máxima (1, 3, 6, 12 y 24h)	Precipitación máxima acumulada en 5 días	Máximo nº días consecutivos precipitación <1 mm	Amplitud térmica	Temperatura máxima extrema	Temperatura mínima extrema	Inundaciones (t 10, 100 y 500 años)	Velocidad máxima del viento
G1	X	X	X	X			X	

ANEJOS

Amenaza/ variable/ Índice Impacto	Precipitación máxima (1, 3, 6, 12 y 24h)	Precipitación máxima acumu- lada en 5 días	Máximo nº días conse- cutivos pre- cipitación <1 mm	Ampli- tud tér- mica	Tempera- tura máxima extrema	Tempera- tura mínima extrema	Inundacio- nes (t 10, 100 y 500 años)	Velocidad máxima del viento
G2	X	X	X	X			X	
G3	X	X	X	X			X	
G4	X	X	X	X			X	
G5	X	X	X	X			X	

**Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de un desmonte**

*Nota: El estudio de sensibilidad de las obras de tierra presenta ciertas particularidades con respecto a otros activos de la carretera, como son pavimentos, puentes y obras de drenaje transversal. La heterogeneidad de su naturaleza y comportamiento hace que la representación fenomenológica de los posibles modos de fallo pueda requerir de una evaluación multicriterio de carácter estocástico. No obstante, un planteamiento de ese tipo excede el alcance de esta metodología, que se limita a proponer una serie de matrices de sensibilidad, con factores que orientan sobre los aspectos a considerar para la valoración de la sensibilidad de los activos. A continuación, se muestra un ejemplo de matriz de sensibilidad para desmontes, que lista una serie de variables ligadas a modos de fallo o impactos potenciales. Se quiere destacar que se trata de un ejemplo básico orientativo aplicado a una realidad específica, que deberá ser adaptado en función de las particularidades del emplazamiento objeto de estudio. Así mismo, procede indicar que, de forma general, no sería recomendable abordar la aplicación de las matrices con un enfoque determinista; a no ser que se estudie una región muy acotada y unos activos concretos cuyo comportamiento es conocido, como es la situación expuesta en el caso práctico reflejado en el punto 5 del texto principal.*

*En caso de falta de datos sobre los activos, se puede recurrir a juicio experto o apoyarse en los mapas de susceptibilidad<sup>8</sup> de deslizamientos desarrollados a nivel europeo (ELSUS v2), basados en un enfoque heurístico-estadístico de los principales factores condicionantes de los deslizamientos. Aunque estos mapas hacen referencia a la predisposición inherente del terreno natural y no a la sensibilidad específica del activo geotécnico, pueden orientar y servir de punto de partida. Dichos mapas pueden ser consultados en el siguiente enlace y tienen, en la versión disponible a fecha de cierre de este documento, una resolución de 200 x 200 m:*

<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-landslide-susceptibility-map-elsus-v2>

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Ángulo de inclinación <sup>9</sup>	Suave (menos de 30°)	Moderada (30 a 40°)	Fuerte (40 a 50°)	Muy fuerte (50 a 60°)	Vertical o sub-vertical (más de 60°)	G1/G2/G3
Altura del desmonte	La altura es menor de 3 metros	La altura es mayor de 3 metros y hasta 6 metros	La altura es mayor de 6 metros y hasta 10 metros	La altura es mayor de 10 metros y hasta 20 metros	La altura es mayor de 20 metros	G1/G2/G3

<sup>8</sup> Término no acuñado en esta metodología.

<sup>9</sup> La valoración del ángulo de inclinación depende del material del desmonte. En esta matriz se hace una propuesta genérica, que se aplicará en el caso de no tener información específica del material del desmonte. En caso de tener esa información, se hará una categorización específica (basada en juicio experto y/o cálculos geotécnicos).

METODOLOGÍA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CARRETERAS

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Tipología de material del desmonte <sup>10</sup>	Material muy poco propenso a la erosión y deslizamiento pedregal o roca	Material algo propenso a la erosión y deslizamiento suelos compactados muy buena cohesión interna	Material medianamente propenso a la erosión y deslizamiento suelos compactados	Material propenso a la erosión y deslizamiento suelos sueltos	Material muy propenso a la erosión y deslizamiento suelos muy sueltos	G1/G2/G3/ G4/G5
Cobertura vegetal (no aplica a desmontes en rocas)	El desmonte presenta más del 75% y hasta un 100% de cobertura vegetal arraigada	El desmonte presenta más del 50% y hasta un 75% de cobertura vegetal arraigada	El desmonte presenta más del 25% y hasta un 50% de cobertura vegetal poco arraigada	El desmonte presenta menos de un 25% de cobertura vegetal (o más superficie, pero apenas arraigada)	El desmonte está descubierto sin presencia vegetal	G4/G5
Tratamiento de mejora, en porcentaje superficial (mallado, gunitado, u otros) <sup>11</sup>	El desmonte presenta más del 75% y hasta un 100%	El desmonte presenta más del 50% y hasta un 75%	El desmonte presenta más del 25% y hasta un 50%	El desmonte presenta menos de un 25%	El desmonte no tiene ningún tratamiento de mejora	G1/G2/G4/ G5
Medidas de mejora del drenaje (drenes californianos, drenes en espina de pez, cuneta de guarda u otras)	El desmonte presenta suficientes medidas de drenaje para interceptar el agua		El desmonte presenta algunas medidas de drenaje para interceptar el agua		El desmonte no tiene medidas para interceptar el agua	G4/G5
Erosión (desmonte en suelo)	Sin presencia de erosión	Se observa erosión leve (inferior al 20%) en el desmonte	Se observa erosión moderada (al menos en el 20%) en el desmonte (pequeños surcos)	Se observa alta erosión (entre el 20 y el 50%) en el desmonte (surcos grandes asociados con zanjas o cárcavas)	Se observa muy alta erosión (más del 50% de la superficie) en el desmonte (zanjas y cárcavas)	G4/G5

<sup>10</sup> En la tabla se hace una propuesta preliminar de carácter genérico. Pero, los aspectos a considerar en la tipología de material dependerán de la zona de estudio, pudiendo ser revisados caso a caso.

Aspectos a considerar:

- Presencia de suelos expansivos
- Presencia de arcillas
- Ángulo de rozamiento interno y resistencia al corte de los suelos empleados
- Resistencia mecánica de las rocas

<sup>11</sup> Expertos del sector consultados apuntan que se debería tener en cuenta el estado de conservación de los elementos de drenaje, de las mallas, de los gunitados, de los drenes californianos, etc. En este sentido, procede indicar que sólo se deberían tener en cuenta los elementos que por su estado de conservación sean funcionales.

ANEJOS

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Grado de meteorización o disgregación (desmante en roca)	No se presentan desprendimientos en el desmante	El desmante presenta pequeños desprendimientos, que son de fácil limpieza	El desmante presenta desprendimientos con tamaños entre los 30 y 60 cm. Se requiere equipo para el mantenimiento	El desmante presenta desprendimientos con tamaños que oscilan entre los 60 y 150 cm. Se requiere maquinaria para el mantenimiento	El desmante presenta desprendimientos mayores a 1,50 metros y presencia de escombros. Se requiere mantenimiento mayor del desmante	G1
Infiltración / Presencia de agua	El desmante no presenta humedad	El desmante presenta humedad	El desmante se encuentra saturado	El desmante presenta pequeñas surgencias o goteo de agua	El desmante presenta surgencias de agua	G4/G5
Cuneta de pie (distancia del talud a la plataforma)	Más de 5 metros	Entre 3 y 5 metros	Entre 1 y 3 metros	Menos de 1 metro	No hay distancia	G1/G4/G5

## OBRAS DE TIERRA. TERRAPLÉN

### Identificación preliminar de impactos

La metodología propuesta plantea basar la evaluación de impactos del cambio climático sobre la infraestructura en el estudio de los posibles modos de fallo de cada elemento de esta. Es decir, se trataría de identificar los modos de fallo más frecuentes y evaluar si el cambio de las condiciones climáticas podría tener alguna influencia en dichos modos de fallo. Una vez realizado este ejercicio, se filtraría en función de las amenazas climáticas esperadas en la zona de estudio (aumento de precipitaciones, aumento de temperatura...) y en base a los fallos más relevantes según datos históricos y el conocimiento de los gestores correspondientes.

Siguiendo este proceso, se presentan a continuación los principales impactos que pueden afectar a un terraplén, asociados a los posibles modos de fallo ante diversas amenazas climáticas.

Tipo de impacto	Código	Nombre del impacto	Procesos relacionados
Geotécnico	G6	Hundimiento del terraplén por licuación del suelo	Aumento del nivel freático; entrada de agua por aparición de fisuras en el pavimento; condiciones hidrogeológicas; condiciones geomorfológicas; tipo de material del terraplén
	G7	Asiento del terraplén debido a hundimiento por fallo en la cimentación o colapso del cuerpo del terraplén	Aumento del nivel freático; entrada de agua por aparición de fisuras en el pavimento; condiciones hidrogeológicas; condiciones geomorfológicas; tipo de material del terraplén
	G8	Hundimiento por cambio de volumen por pérdida de humedad	Aumento del nivel freático; entrada de agua por aparición de fisuras en el pavimento; ciclos de humedad sequedad; condiciones hidrogeológicas; condiciones geomorfológicas
	G9	Erosión de taludes en terraplenes próximos a cauce de un río o encauzamiento o ramblas	Aumento del nivel freático; entrada de agua por crecida del río o subida de cota del nivel del río; condiciones hidrogeológicas; condiciones geomorfológicas; tipo de material del terraplén
	G10	Erosión en el cuerpo del terraplén (Cárcavas o torrenteras)	Ciclos de humedad sequedad, mal desagüe de la carretera, lluvias torrenciales

### Identificación de amenazas relacionadas

*Nota: Siempre que sea posible se tendrán en cuenta las proyecciones de las variables consignadas como amenazas, tal y como se explica con detalle en el cuerpo de la metodología.*

Amenaza/ variable/ índice Impacto	Precipitación máxima (1, 3, 6, 12 y 24h)	Precipitación máxima acumulada en 5 días	Máximo nº días consecutivos precipitación <1 mm	Amplitud térmica	Temperatura máxima extrema	Temperatura mínima extrema	Inundaciones (t 10, 100 y 500 años)	Velocidad máxima del viento
G6	X	X	X	X			X	
G7	X	X	X	X			X	
G8	X	X	X	X			X	

ANEJOS

Ame- naza/ va- riable/ Índice Impacto	Precipita- ción má- xima (1, 3, 6, 12 y 24h)	Precipita- ción má- xima acu- mulada en 5 días	Máximo nº días conse- cutivos pre- cipitación <1 mm	Amplitud térmica	Tempera- tura máxima extrema	Tempera- tura mínima extrema	Inundacio- nes (t 10, 100 y 500 años)	Velocidad máxima del viento
<b>G9</b>	X	X	X	X			X	
<b>G10</b>	X	X	X		X			X

**Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de un terraplén**

*Nota: El estudio de sensibilidad de las obras de tierra presenta ciertas particularidades con respecto a otros activos de la carretera, como son pavimentos, puentes y obras de drenaje transversal. La heterogeneidad de su naturaleza y comportamiento hace que la representación fenomenológica de los posibles modos de fallo pueda requerir de una evaluación multicriterio de carácter estocástico. No obstante, un planteamiento de ese tipo excede el alcance de esta metodología, que se limita a proponer una serie de matrices de sensibilidad, con factores que orientan sobre los aspectos a considerar para la valoración de la sensibilidad de los activos. A continuación, se muestra un ejemplo de matriz de sensibilidad para terraplenes, que lista una serie de variables ligadas a modos de fallo o impactos potenciales. Se quiere destacar que se trata de un ejemplo básico orientativo aplicado a una realidad específica, que deberá ser adaptado en función de las particularidades del emplazamiento objeto de estudio. Así mismo, procede indicar que, de forma general, no sería recomendable abordar la aplicación de las matrices con un enfoque determinista; a no ser que se estudie una región muy acotada y unos activos concretos cuyo comportamiento es conocido, como es la situación expuesta en el caso práctico reflejado en el punto 5 del texto principal.*

*En caso de falta de datos sobre los activos, se puede recurrir a juicio experto o apoyarse en los mapas de susceptibilidad<sup>12</sup> de deslizamientos desarrollados a nivel europeo (ELSUS v2), basados en un enfoque heurístico-estadístico de los principales factores condicionantes de los deslizamientos. Aunque estos mapas hacen referencia a la predisposición inherente del terreno natural y no a la sensibilidad específica del activo geotécnico, pueden orientar y servir de punto de partida. Dichos mapas pueden ser consultados en el siguiente enlace y tienen, en la versión disponible a fecha de cierre de este documento, una resolución de 200 x 200 m:*

<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-landslide-susceptibility-map-elsus-v2>

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Ángulo de inclinación <sup>13</sup>	Suave (menos de 30°)	Moderada (30 a 40°)	Fuerte (40 a 50°)	Muy fuerte (50-60°)	Vertical o sub-vertical (más de 60°)	G7, G9
Altura del terraplén	La altura es menor a 3 metros	La altura es mayor a 3 metros y hasta 6 metros	La altura es mayor a 6 metros y hasta 10 metros	La altura es mayor a 10 metros y hasta 14 metros	La altura es mayor a 14 metros	G6 a G9

<sup>12</sup> Término no acuñado en esta metodología.

<sup>13</sup> La valoración del ángulo de inclinación depende del material del terraplén. En esta matriz se hace una propuesta genérica, que se aplicará en el caso de no tener información específica del material del terraplén. En caso de tener esa información, se hará una categorización específica (basada en juicio experto y/o cálculos geotécnicos).

METODOLOGÍA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CARRETERAS

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Tipología de relleno <sup>14</sup>	Material muy poco propenso a la erosión y deslizamiento (pedraplén o roca)	Material algo propenso a la erosión y deslizamiento (suelos compactados muy buena cohesión interna)	Material medianamente propenso a la erosión y deslizamiento (suelos compactados)	Material propenso a la erosión y deslizamiento (suelos sueltos)	Material muy propenso a la erosión y deslizamiento (suelos muy sueltos)	G6 a G10
Cobertura vegetal (no aplica a pedraplenes con rocas no meteorizables)	El terraplén presenta más del 75% y hasta un 100% de cobertura vegetal	El terraplén presenta más del 50% y hasta un 75% de cobertura vegetal	El terraplén presenta más del 25% y hasta un 50% de cobertura vegetal	El terraplén presenta menos de un 25% de cobertura vegetal	El terraplén esta descubierto sin presencia vegetal	G7, G9, G10
Tratamiento de mejora, en porcentaje superficial (refuerzo a pie de terraplén, etc.)	El terraplén presenta más del 75% y hasta un 100%	El terraplén presenta más del 50% y hasta un 75%	El terraplén presenta más del 25% y hasta un 50%	El terraplén presenta menos de un 25%	El terraplén no tiene ningún tratamiento de mejora	G7, G9
Medidas de mejora del drenaje (drenes californianos, drenes en espina de pez, cunetas de pie longitudinales u otras)	El terraplén presenta suficientes medidas de drenaje para interceptar el agua		El terraplén presenta algunas medidas de drenaje para interceptar el agua		El terraplén no tiene medidas para interceptar el agua	G7, G9, G10
Asientos y grietas en el pavimento (atribuibles a deformación del terraplén)	No hay presencia de asientos ni grietas en el pavimento		El pavimento presenta ligeros asientos y grietas pequeñas (3-10 mm)		El pavimento presenta asientos visibles y grietas mayores a 10 mm	G6 a G8

<sup>14</sup> En la tabla se hace una propuesta preliminar de carácter genérico. Pero, los aspectos a considerar en la tipología de suelo dependerán de la zona de estudio, pudiendo ser revisados caso a caso.

Aspectos a considerar:

- Presencia de suelos expansivos
- Presencia de arcillas
- Ángulo de rozamiento interno y resistencia al corte de los suelos empleados

ANEJOS

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Entorno de secciones próximas a cauces de ríos o encauzamientos o ramblas (limpieza de cunetas, ODTs, cauces, pendiente)	El entorno está en condiciones adecuadas		El entorno está en condiciones no suficientemente adecuadas		El entorno está en condiciones inadecuadas	G9
Erosión	Sin presencia de erosión	Se observa erosión leve en el talud del terraplén (erosión laminar)	Se observa erosión moderada en el talud del terraplén (pequeños surcos)	Se observa alta erosión en el talud del terraplén (surcos grandes asociados con zanjas o cárcavas)	Se observa muy alta erosión en el talud del terraplén (zanjas y cárcavas)	G9, G10



## ANEJO 2. MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE ESTRUCTURAS

### Identificación preliminar de impactos

La metodología propuesta plantea basar la evaluación de impactos del cambio climático sobre la infraestructura en el estudio de los posibles modos de fallo de cada elemento de esta. Es decir, se trataría de identificar los modos de fallo más frecuentes y evaluar si el cambio de las condiciones climáticas podría tener alguna influencia en dichos modos de fallo. Una vez realizado este ejercicio, se filtraría en función de las amenazas climáticas esperadas en la zona de estudio (aumento de precipitaciones, aumento de temperatura...) y en base a los fallos más relevantes según datos históricos y el conocimiento de los gestores correspondientes.

Siguiendo este proceso, se presentan a continuación los principales impactos que pueden afectar a un puente, asociados a los posibles modos de fallo ante diversas amenazas climáticas:

Tipo de impacto	Código	Nombre del impacto	Procesos relacionados
Durabilidad	D1	Degradación acelerada de la superestructura	Fisuración, erosión, pérdida de material por presencia de humedad, eflorescencias, vegetación o por exposición a ciclos hielo-deshielo
	D2	Degradación acelerada de la subestructura	Fisuración, erosión, pérdida de material por presencia de humedad, eflorescencias, vegetación o por exposición a ciclos hielo-deshielo
Capacidad de servicio / Funcionalidad	S1	Degradación acelerada del pavimento	Fisuración, hundimientos, pérdida de material
Geotécnico	G1	Incremento de problemas de socavación	Pérdida de material, descalces
Mayor demanda / Incremento de sollicitación	I1	Incremento de la acción de las olas en pilares y estribos	Aumento de la sollicitación, impactos que pueden causar desprendimientos locales.
	I2	Incremento de cargas inducidas por el viento	Aumento de la sollicitación, impactos que pueden causar desprendimientos locales.
	I3	Incremento de tensiones inducidas térmicamente	Aumento de la sollicitación
	I4	Demanda adicional de capacidad de drenaje	Obstrucción, rebase y subpresiones bajo el tablero
	I5	Mayor presión hidrostática detrás de los estribos de los puentes (precipitaciones, inundaciones)	Movimientos, vuelco
Cargas accidentales	A1	Posible golpe de troncos, rocas, etc... sobre las pilas como consecuencia de inundaciones	Deformaciones, fisuras, grietas, colapsos

**Identificación de amenazas relacionadas**

*Nota: Siempre que sea posible se tendrán en cuenta las proyecciones de las variables consignadas como amenazas, tal y como se explica con detalle en el cuerpo de la metodología.*

Amenaza/ variable/ índice Impacto	Precipitación máxima (1, 3, 6, 12 y 24h)	Precipitación máxima acumulada en 5 días	Máximo nº días con- secutivos precipita- ción <1 mm	Amplitud térmica	Tempera- tura má- xima extrema	Tempera- tura mínima extrema	Inundacio- nes (t 10, 100 y 500 años)	Velocidad máxima del viento
D1	X		X	X	X	X	X	X
D2	X		X	X	X	X	X	X
S1				X	X	X		
G1	X	X	X				X	X
I1							X	X
I2								X
I3				X	X	X		
I4	X	X					X	
I5	X	X					X	
A1	X	X					X	

**Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de una estructura**

*Nota: Los impactos y sus consecuencias, y por tanto los niveles de sensibilidad consignados en esta matriz dependen del tipo de elemento (material, tipología, etc.). No obstante, la tabla recoge una propuesta genérica. Se trata de un ejemplo básico orientativo para que en cada caso se pueda hacer una propuesta específica, pudiéndose ampliar para hacerlo más detallado.*

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Edad del activo	Menos de 10 años	Entre 11 y 30 años	Entre 31 y 50 años	Entre 51 y 70 años	Más de 70 años	D1- D2/S1/G1/I1 -I5/A1
Estado de conservación (Condición del activo)	Puente en excelente estado, o con daños durables menores y aislados	Puente en buen estado, con daños durables menores generalizados, o moderados puntuales	Puente con daños durables moderados de forma generalizada; o daños funcionales en elementos no estructurales	Puente con daños graves, durables o funcionales, que afectan a los elementos estructurales, o puente con daños mecánicos de severidad media	Puente con daños mecánicos graves, que comprometan la estabilidad de la estructura o la seguridad de los usuarios	D1- D2/S1/G1/I1 -I5/A1
Material del tablero	Fábrica	Hormigón armado	Hormigón pretensado	Metálicos y mixtos	Madera	D1/D2
Actuaciones regulares de mantenimiento	Recurrente	Frecuente	Poco frecuente	Puntual / Aisladas	No se realizan actuaciones de mantenimiento	D1-D2/S1

METODOLOGÍA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CARRETERAS

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Gravedad de daños durables en última inspección	Sin daños	Daños durables leves	Daños durables moderados	Daños durables graves o generalizados	Daños durables graves y generalizados	D1-D2/S1
Sistema de drenaje	Existencia de goterón y de desagües que aseguran que el vertido no contacta con ninguna parte de la estructura		Sistema de drenaje cuyos goterones o desagües no aseguran que el agua no entre en contacto con la estructura		Sin elemento de drenaje alguno	D1/D2
Uso de sales fundentes como actividad de mantenimiento	No	Puntual	Poco frecuente	Frecuente	Recurrente	D1-D2/S1
Grado de socavación actual	No existe socavación	Socavación leve y puntual	Socavación leve generalizada	Socavación moderada/grave puntual	Socavación moderada/grave generalizada	G1
Tipología de la cimentación	Cimentación profunda		Cimentación superficial atada / con contrabóveda		Cimentación superficial	G1/I1
Pilas sobre el cauce	0%	<25%	<50%	<75%	>75%	G1
Existencia de tajamar o elementos de protección en pilas	100%	>75%	>50%	>25%	<25%	G1
Existencia de elementos de protección en estribos (i.e. aletas, escollera)	Total (aguas arriba, aguas abajo y sección paralela al cauce)	Aguas arriba y sección paralela al cauce	Aguas arriba	Sección paralela al cauce	Sin protección	G1/I1/I5
Orientación del flujo de agua con respecto a la directriz de la estructura	90°-70°		70°-40°		<40°	G1/I1/I5

ANEJOS

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Tipología estructural	Marcos y Bóvedas	Puente losa y puente cajón	Puente de vigas	Puentes celosía	Puentes arco, atirantados y colgantes	I2
Luz máxima	$L < 10 \text{ m}$	$25 > L > 10 \text{ m}$	$50 > L > 25 \text{ m}$	$100 > L > 50 \text{ m}$	$L > 100 \text{ m}$	I3
Peso del tablero (Material del tablero)	Fábrica	Hormigón pretensado	Hormigón armado	Mixto	Metálico o madera	I4
Configuración estructural	Marcos y Bóvedas	Hiperestático		Isostático		I3-I4
Capacidad hidráulica de diseño	T500		T300		T100	I4
Tipología de los apoyos	Apoyos anclados	Apoyos fijos	Rótulas	Apoyos móviles	Sin aparato de apoyo	I4
Luz del vano menor	$L > 100 \text{ m}$	$100 > L > 50 \text{ m}$	$50 > L > 25 \text{ m}$	$25 > L > 10 \text{ m}$	$L < 10 \text{ m}$	A1
Tipología de las pilas	No existen pilas intermedias	Pilas muro (macizas)	Pilas martillo	Pilas pórtico	Fustes independientes	A1
Limpieza del cauce (estado del entorno)	Riberas limpias. No existen objetos susceptibles de ser arrastrados.		Existen pequeños objetos en el cauce o riberas, susceptibles de ser arrastrados.		Existen objetos de gran tamaño en el cauce o riberas, susceptibles de ser arrastrados.	A1

## ANEJO 3. MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE OBRAS DE DRENAJE TRANSVERSAL

### Identificación preliminar de impactos

La metodología propuesta plantea basar la evaluación de impactos del cambio climático sobre la infraestructura en el estudio de los posibles modos de fallo de cada elemento de esta. Es decir, se trataría de identificar los modos de fallo más frecuentes y evaluar si el cambio de las condiciones climáticas podría tener alguna influencia en dichos modos de fallo. Una vez realizado este ejercicio, se filtraría en función de las amenazas climáticas esperadas en la zona de estudio (aumento de precipitaciones, aumento de temperatura...) y en base a los fallos más relevantes según datos históricos y el conocimiento de los gestores correspondientes.

Siguiendo este proceso, se presentan a continuación los principales impactos que pueden afectar a una obra de drenaje transversal, asociados a los posibles modos de fallo ante diversas amenazas climáticas.

La identificación de impactos se ha realizado partiendo del documento *Secciones de la red estatal de infraestructuras de transporte terrestre potencialmente más expuestas por razón de la variabilidad y cambio climáticos* (CEDEX, 2018). El listado de impactos ha sido completado teniendo en cuenta los posibles modos de fallos de una obra de drenaje transversal para los cuales las variables climáticas pueden ser los principales agentes desencadenantes.

Tipo de impacto	Código	Nombre del impacto	Procesos relacionados
Durabilidad	D1	Degradación acelerada de la ODT, pérdida de capacidad estructural y funcional por acciones ambientales (ej. ciclos hielo-deshielo)	Erosión y corrosión dañando los elementos de la ODT, paramentos, solera, aletas Entorno corrosivo para cimentaciones Biodegradación de bases bajo nuevas condiciones aeróbicas Corrosión en zonas de salpicaduras y aguas bajas Corrosión inducida por incremento de carbonatación Corrosión inducida y acelerada por el empleo de fundentes para restablecer la vialidad invernal Sometimiento a estrés climático por ciclos de hielo-deshielo, variabilidad de la estacionalidad temperatura y humedad Niveles de inundación más altos e inundaciones más frecuentes
	D2	Incremento de la erosión y socavación a la entrada y salida de la ODT por incremento en precipitaciones intensas	Erosión dañando los elementos de la ODT, paramentos, solera, aletas, fuerza y velocidad del agua relacionada con el incremento en las precipitaciones intensas

ANEJOS

Tipo de impacto	Código	Nombre del impacto	Procesos relacionados
Capacidad de servicio / Funcionales	S1	Capacidad hidráulica insuficiente del sistema de drenaje por incremento en precipitaciones extremas	<p>Insuficiente capacidad hidráulica de la ODT al aumentar la precipitación punta, concentración de altas precipitaciones en el tiempo</p> <p>Arrastres por erosión laderas, aumento de suciedad, colmatación de las ODTs</p> <p>Pendientes laterales menos estables</p>

**Identificación de amenazas relacionadas**

*Nota: Siempre que sea posible se tendrán en cuenta las proyecciones de las variables consignadas como amenazas, tal y como se explica con detalle en el cuerpo de la metodología.*

Amenaza/variable/índice Impacto	Precipitación máxima (1, 3, 6, 12 y 24h)	Precipitación máxima acumulada en 5 días	Máximo nº días consecutivos precipitación <1 mm	Amplitud térmica	Temperatura máxima extrema	Temperatura mínima extrema	Inundaciones (t 10, 100 y 500 años)	Velocidad máxima del viento
D1	X	X	X	X			X	
D2	X	X	X				X	
S1	X	X	X				X	

**Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de una obra de drenaje transversal**

*Nota: Los impactos y sus consecuencias, y por tanto los niveles de sensibilidad consignados en esta matriz dependen del tipo de elemento (material, tipología, etc.). No obstante, la tabla recoge una propuesta genérica. Se trata de un ejemplo básico orientativo para que en cada caso se pueda hacer una propuesta específica, pudiéndose ampliar para hacerlo más detallado.*

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Edad del activo	Menos de 10 años	Entre 11 y 30 años	Entre 31 y 50 años	Entre 51 y 70 años	Más de 70 años	D1, D2
Limpieza del conducto de la ODT (aterramiento)	Conducto totalmente limpio (no presenta signo alguno de pérdida de capacidad hidráulica)	Existen pequeños arrastres (lo que implica mínima pérdida de capacidad hidráulica <10%)	La ODT se encuentra parcialmente aterrada (lo que implica cierta pérdida de capacidad hidráulica <20%)	La ODT se encuentra significativamente aterrada (lo que implica notable pérdida de capacidad hidráulica <50%)	La ODT se encuentra totalmente obturada (lo que implica importante pérdida de capacidad hidráulica >50%, dejando de cumplir su función)	S1
Capacidad hidráulica de diseño <sup>15</sup>	Está dimensionado para capacidad hidráulica excepcional Qd (T > 500 años)	Está dimensionado para capacidad hidráulica superior a norma Qd (T entre 100 y 500 años)	Está dimensionado para capacidad hidráulica según norma Qd (T = 100 años)	Está dimensionado para capacidad hidráulica inferior a la norma Qd (T entre 100 y 50 años)	Está dimensionado para capacidad hidráulica muy inferior a la norma Qd (T < 50 años)	S1

<sup>15</sup> La actual instrucción de drenaje pide dimensionar las ODT para un caudal correspondiente a T=100 años, de manera general.

ANEJOS

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Estado de mantenimiento/ degradación de la ODT	Excelente (no presenta daños)	Muy bueno (sólo presenta daños puntuales, primeros signos)	Bueno (presenta daños, signos parciales afectando a <50% de su longitud)	Satisfactorio (presenta daños signos importantes afectando a >75% de su longitud)	Pobre (presenta daños significativos afectando a la práctica totalidad)	D1 y D2
Estado del entorno (cauce, dirección del flujo y embocadura; existencia de obstáculos que puedan provocar efecto barrera)	El cauce no presenta cambios de dirección del flujo <sup>16</sup> con respecto a su diseño en la embocadura; y se mantiene limpio	El cauce presenta cambios ligeros de dirección del flujo con respecto a su diseño y/o presenta alguna acumulación de material de arrastre y/o vegetación (<10%)	El cauce presenta cambios en la dirección del flujo con respecto a su diseño y/o presenta acumulación de material de arrastre y/o vegetación (<20%)	El cauce presenta cambios moderados en la dirección del flujo con respecto a su diseño y/o presenta acumulación moderada de material de arrastre y/o vegetación (<50%)	El cauce presenta cambios significativos en la dirección del flujo con respecto a su diseño (dejando de cumplir su función) y/o presenta acumulación importante de material de arrastre y/o vegetación (>50%)	D2 y S1
Existencia de elementos de protección a la entrada/salida de la obra (cabecera y muros ala, rejillas o mecanismos que impidan la obstrucción)  (Capacidad de adaptación)	Existen suficientes elementos de protección		Existen algunos elementos de protección		No existen elementos de protección	D2 y S1

<sup>16</sup> Cambios en la dirección del flujo se refieren tanto a la inclinación con respecto a la embocadura de la ODT, lo que puede provocar erosión, como a cambios en el cauce, lo que puede hacer que cambie la funcionalidad de la ODT.



## ANEJO 4. MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE PAVIMENTOS BITUMINOSOS

### Identificación preliminar de impactos

La metodología propuesta plantea basar la evaluación de impactos del cambio climático sobre la infraestructura en el estudio de los posibles modos de fallo de cada elemento de esta. Es decir, se trataría de identificar los modos de fallo más frecuentes y evaluar si el cambio de las condiciones climáticas podría tener alguna influencia en dichos modos de fallo. Una vez realizado este ejercicio, se filtraría en función de las amenazas climáticas esperadas en la zona de estudio (aumento de precipitaciones, aumento de temperatura...) y en base a los fallos más relevantes según datos históricos y el conocimiento de los gestores correspondientes.

Siguiendo este proceso, se presentan a continuación los principales impactos que pueden afectar a un pavimento bituminoso, asociados a los posibles modos de fallo ante diversas amenazas climáticas.

La identificación de impactos se ha realizado partiendo del documento *Secciones de la red estatal de infraestructuras de transporte terrestre potencialmente más expuestas por razón de la variabilidad y cambio climáticos* (CEDEX, 2018). El listado de impactos ha sido completado teniendo en cuenta los posibles modos de fallos de un pavimento para los cuales las variables climáticas pueden ser los principales agentes desencadenantes.

Tipo de impacto	Código	Nombre del impacto	Procesos relacionados
Durabilidad	D1	Fatiga del firme por acciones térmicas (ciclos hielo-deshielo; diferencias temperatura día-noche)	Tipo de betún, tipo de mezcla, acciones térmicas, acción del tráfico pesado
	D2	Aparición de roderas debido a incremento de las temperaturas máximas	Tipo de betún, tipo de mezcla, acciones térmicas, temperaturas máximas, acción del tráfico pesado
	D3	Fisuración del firme por la acción de fundentes	Tipo de betún, tipo de mezcla, acciones térmicas, temperaturas mínimas, vialidad invernal, acción del tráfico pesado
Capacidad de servicio / Funcionales	S1	Presencia de agua en el pavimento por lluvias intensas	Tipo de betún, tipo de mezcla, drenabilidad de mezcla, estado superficial del pavimento, condiciones de drenaje de la calzada, precipitación intensa

### Identificación de amenazas relacionadas

*Nota: Siempre que sea posible se tendrán en cuenta las proyecciones de las variables consignadas como amenazas, tal y como se explica con detalle en el cuerpo de la metodología.*

Amenaza/variable/Índice Impacto	Precipitación máxima (1, 3, 6, 12 y 24h)	Precipitación máxima acumulada en 5 días	Máximo nº días consecutivos precipitación <1 mm	Amplitud térmica	Temperatura máxima extrema	Temperatura mínima extrema	Inundaciones (t 10, 100 y 500 años)	Velocidad máxima del viento
D1				X	X	X		
D2					X			
D3						X		
S1	X	X	X				X	

ANEJOS

**Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de un pavimento bituminoso**

*Nota: Los impactos y sus consecuencias, y por tanto los niveles de sensibilidad consignados en esta matriz dependen del tipo de elemento (material, tipología, etc.). No obstante, la tabla recoge una propuesta genérica. Se trata de un ejemplo básico orientativo para que en cada caso se pueda hacer una propuesta específica, pudiéndose ampliar para hacerlo más detallado.*

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Edad del activo	Menos de 2 años	Entre 2 y 5 años	Entre 5 y 10 años	Entre 10 y 20 años	Más de 20 años	D1, D2, D3, S1
Estado del firme	Excelente	Muy bueno	Bueno	Satisfactorio	Pobre	D1, D3, S1
Deformaciones (rode-ras, canalizaciones, baches, ondulaciones)	Menores a 1 cm	Mayor a 1 cm y hasta 2 cm	Mayor a 2 cm y hasta 3 cm	Mayor a 3 cm y hasta 4 cm	Mayor a 4 cm	D2, S1
Estado superficial (índice de rugosidad internacional - IRI)	El IRI es menor a 1.0 dm/hm	El IRI se encuentra entre 1.0 y 1.5 dm/hm	El IRI se encuentra entre 1.5 y 2.5 dm/hm	El IRI se encuentra entre 2.5 y 5.0 dm/hm	El IRI es mayor a 5.0 dm/hm	D1, S1
Desprendimientos (pérdida de áridos)	Menos del 5% de la superficie	Entre el 6% y 15% de la superficie	Entre el 16% y 30% de la superficie	Entre el 31% y 40% de la superficie	Más del 40% de la superficie	D1, D3, S1
Fisuración	Grietas menores a 2mm en menos del 5% de la superficie	Grietas longitudinales mayores a 3mm entre el 5 y el 20% de la superficie	Grietas longitudinales y transversales mayores a 3mm (entre el 20% y 50% de la superficie del pavimento)	Grietas longitudinales y transversales mayores a 3mm (entre el 20% y 50%); existencia de cuarteo en malla fina de la superficie	Grietas longitudinales y transversales mayores a 3mm en más del 50%; existencia de cuarteo en malla gruesa de la superficie	D1, D3, S1
Características drenantes de la capa de rodadura	Firme drenante abierto bien conservado		Firme semi-cerrado		Firme colmatado o cerrado	S1
Sección transversal del firme (bombeo y peralte)	Con adecuado bombeo, peralte		Con presencia de agua en puntos aislados (problemas puntuales en el bombeo o peralte)		Con presencia de acumulaciones de agua en varios puntos (bombeo y peralte insuficientes)	S1

METODOLOGÍA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CARRETERAS

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Drenaje longitudinal	Mantenimiento adecuado de cunetas		Mantenimiento deficiente de cunetas		Mantenimiento muy deficiente de cunetas	S1
Asentamiento/Hundimiento en la calzada (pérdida de capacidad estructural)	No hay evidencia de asentamientos	Existe asentamiento poco perceptible en la calzada	El asentamiento es evidente en al menos un carril de la calzada	El asentamiento es evidente en toda la calzada	El asentamiento es muy evidente en toda la calzada	D1, S1
Tipo de ligante empleado en la mezcla	Betún modificado		Betún mejorado		Betún blando	D1, D2, D3
Reparaciones previas	No ha necesitado reparaciones previas	Reparación puntual (parche o sellado pequeño)	Campañas de reparación con frecuencia 3-5 años	Campañas de reparación (incluyendo saneos, rehabilitación superficial) con frecuencia 1-3 años	Reparaciones anuales (incluyendo saneos, rehabilitación superficial)	D1, D2, D3, S1

## ANEJO 5. MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE TÚNELES

### Identificación preliminar de impactos

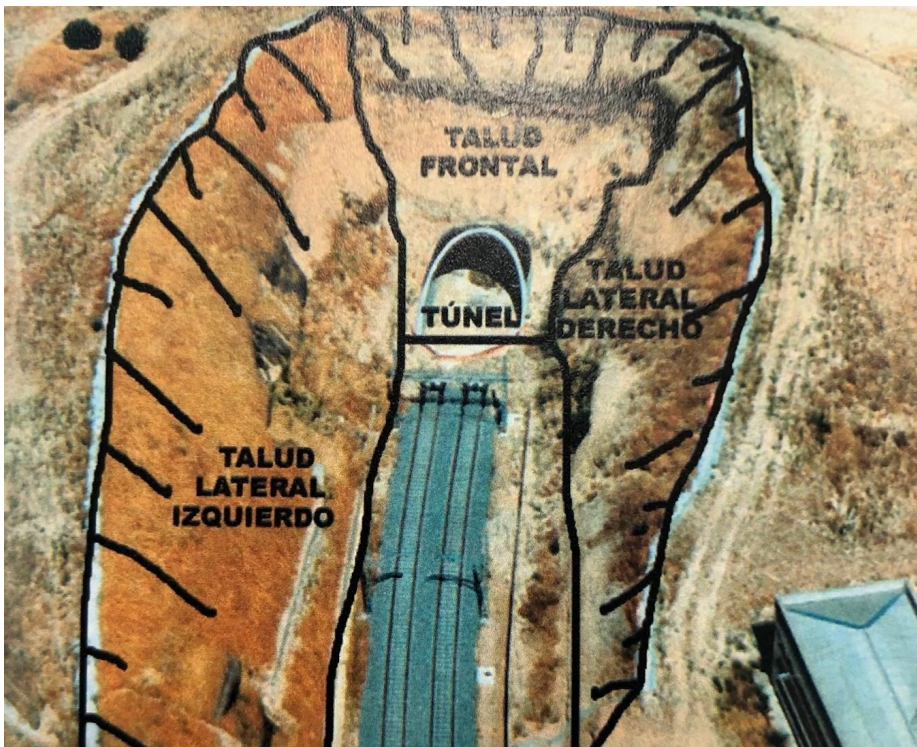
La metodología propuesta plantea basar la evaluación de impactos del cambio climático sobre la infraestructura en el estudio de los posibles modos de fallo de cada elemento de esta. Es decir, se trataría de identificar los modos de fallo más frecuentes y evaluar si el cambio de las condiciones climáticas podría tener alguna influencia en dichos modos de fallo. Una vez realizado este ejercicio, se filtraría en función de las amenazas climáticas esperadas en la zona de estudio (aumento de precipitaciones, aumento de temperatura...) y en base a los fallos más relevantes, según datos históricos y el conocimiento de los gestores correspondientes.

Siguiendo este proceso, se presentan a continuación los principales impactos que pueden afectar a un túnel, asociados a los posibles modos de fallo ante diversas amenazas climáticas.

El listado de impactos ha sido completado teniendo en cuenta los posibles modos de fallos de un túnel para los cuales las variables climáticas pueden ser los principales agentes desencadenantes.

En un túnel, la mayor parte de los fallos en los que las variables climáticas pueden ser un factor determinante se encuentran, lógicamente, en la parte exterior del túnel. Se refieren, por tanto, a la estabilidad de los taludes de desmonte del emboquille. En el emboquille se pueden distinguir las partes siguientes:

- Talud frontal, que es el que se genera en el frente del túnel
- Taludes laterales, situados a ambos lados del talud frontal



El emboquille, en especial su talud frontal, es un punto singular, una de las partes más delicadas del activo túnel, y la parte más susceptible de verse afectada por las condiciones climáticas.

El emboquille debe proteger a la vía de una invasión de materiales que procedan de inestabilidades y debe ser auto-estable. La estabilidad debe garantizarse ante las peores situaciones previsibles.

El resto del túnel tiene carácter subterráneo razón por la cual, la mayor parte de su construcción, revestimientos, instalaciones y equipos se ven poco afectados por la meteorología.

A efectos de la presente metodología, la estabilidad de estos taludes se abordará empleando impactos y factores de sensibilidad muy similares a los empleados en el cálculo de la sensibilidad de los desmontes.

Adicionalmente, se tendrá en cuenta el impacto específico del cambio climático sobre el propio túnel (D1 en la tabla siguiente).

Tipo de impacto	Código	Nombre del impacto	Procesos relacionados
Geotécnico	G1	Desprendimiento de rocas y/o tierra del talud	Fracturación del talud rocoso. Presencia de agua. Ciclos hielo deshielo en las fisuras. Condiciones geomorfológicas
	G2	Vuelco o toppling	Fracturación del talud rocoso. Presencia de agua. Ciclos hielo deshielo en las fisuras. Condiciones geomorfológicas
	G3	Deslizamiento traslacional o rotacional (profundo)	Ángulo de inclinación y altura del desmonte, ángulo de rozamiento interno, cohesión del suelo, resistencia al corte; ciclos humedad sequedad, precipitación intensa y precipitación acumulada en varios días; condiciones geomorfológicas
	G4	Deslizamiento superficial del talud	Meteorización superficial, presencia o no de vegetación, fallo en el drenaje de coronación del desmonte (cuneta de guarda); ciclos humedad sequedad, precipitación intensa y precipitación acumulada en varios días
	G5	Torrenteras	Existencia de cauces en la ladera o en el propio desmonte debido a precipitaciones intensas
Durabilidad*	D1	Delaminación del revestimiento	Características del revestimiento del túnel. Presencia y tipo de agua. Ciclos hielo deshielo en los primeros metros del túnel

\* En Durabilidad se ha valorado considerar como impacto el deterioro acelerado de los elementos de ventilación, pero no se ha considerado significativo. Finalmente, el único impacto que se ha considerado en el interior de los túneles ha sido la delaminación del revestimiento, que solo aplica a túneles revestidos. Se han descartado otros impactos en el interior de los túneles porque de haberlos se considera que no serían debidos al cambio climático.

**Identificación de amenazas relacionadas**

*Nota: Siempre que sea posible se tendrán en cuenta las proyecciones de las variables con signadas como amenazas, tal y como se explica con detalle en el cuerpo de la metodología.*

Amenaza/ variable/ índice Impacto	Precipitación máxima (1, 3, 6, 12 y 24h)	Precipitación máxima acumulada en 5 días	Máximo nº días conse- cutivos precipita- ción <1 mm	Ampli- tud tér- mica	Tempera- tura má- xima extrema	Tempera- tura mínima extrema	Inundacio- nes (t 10, 100 y 500 años)	Velocidad máxima del viento
G1	X	X	X	X			X	
G2	X	X	X	X			X	
G3	X	X	X	X			X	
G4	X	X	X	X			X	
G5	X	X	X				X	

## ANEJOS

Amenaza/ variable/ Índice Impacto	Precipitación máxima (1, 3, 6, 12 y 24h)	Precipitación máxima acumulada en 5 días	Máximo nº días consecutivos precipitación <1 mm	Amplitud térmica	Temperatura máxima extrema	Temperatura mínima extrema	Inundaciones (t 10, 100 y 500 años)	Velocidad máxima del viento
D1	X	X	X	X			X	

### Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de un túnel

*Nota: El estudio de sensibilidad de los túneles presenta ciertas particularidades con respecto a otros activos de la carretera, como son pavimentos, puentes y obras de drenaje transversal. La heterogeneidad de su naturaleza y comportamiento hace que la representación fenomenológica de los posibles modos de fallo pueda requerir de una evaluación multicriterio de carácter estocástico. No obstante, un planteamiento de ese tipo excede el alcance de esta metodología, que se limita a proponer una serie de matrices de sensibilidad, con factores que orientan sobre los aspectos a considerar para la valoración de la sensibilidad de los activos. A continuación, se muestra un ejemplo de matriz de sensibilidad para túneles, que lista una serie de variables ligadas a modos de fallo o impactos potenciales. Se quiere destacar que se trata de un ejemplo básico orientativo aplicado a una realidad específica, que deberá ser adaptado en función de las particularidades del emplazamiento objeto de estudio. Así mismo, procede indicar que, de forma general, no sería recomendable abordar la aplicación de las matrices con un enfoque determinista; a no ser que se estudie una región muy acotada y unos activos concretos cuyo comportamiento es conocido, como es la situación expuesta en el caso práctico reflejado en el punto 5 del texto principal.*

*En caso de falta de datos sobre los activos, se puede recurrir a juicio experto o apoyarse en los mapas de susceptibilidad<sup>17</sup> de deslizamientos desarrollados a nivel europeo (ELSUS v2), basados en un enfoque heurístico-estadístico de los principales factores condicionantes de los deslizamientos. Aunque estos mapas hacen referencia a la predisposición inherente del terreno natural y no a la sensibilidad específica del activo geotécnico, pueden orientar y servir de punto de partida. Dichos mapas pueden ser consultados en el siguiente enlace y tienen, en la versión disponible a fecha de cierre de este documento, una resolución de 200 x 200 m:*

<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-landslide-susceptibility-map-elsus-v2>

#### 1. En Emboquilles:

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Ángulo de inclinación <sup>18</sup>	Suave (menos de 30°)	Moderada (30 a 40°)	Fuerte (40 a 50°)	Muy fuerte (50-60°)	Vertical o sub-vertical (más de 60°)	G1/G2/G3
Altura del desmonte	La altura es menor a 5 metros	La altura es mayor a 5 y hasta 10 metros	La altura es mayor a 10 metros y hasta 20 metros	La altura es mayor a 20 metros y hasta 40 metros	La altura es mayor a 40 metros	G1/G2/G3

<sup>17</sup> Término no acuñado en esta metodología.

<sup>18y3</sup> La valoración del ángulo de inclinación y del tratamiento de mejora dependen del material del desmonte. En esta matriz se hace una propuesta genérica, que se aplicará en el caso de no tener información específica del material del desmonte. En caso de tener esa información, se hará una categorización específica (basada en juicio experto y/o cálculos geotécnicos).

METODOLOGÍA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CARRETERAS

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Tipología de material del desmonte <sup>19</sup>	Material muy poco propenso a la erosión y deslizamiento	Material algo propenso a la erosión y deslizamiento	Material medianamente propenso a la erosión y deslizamiento	Material propenso a la erosión y deslizamiento	Material muy propenso a la erosión y deslizamiento	G1/G2/G3 /G4/G5
Cobertura vegetal (no aplica a desmontes en rocas)	El desmonte presenta más del 75% y hasta un 100% de cobertura vegetal arraigada	El desmonte presenta más del 50% y hasta un 75% de cobertura vegetal arraigada	El desmonte presenta más del 25% y hasta un 50% de cobertura vegetal poco arraigada	El desmonte presenta menos de un 25% de cobertura vegetal (o más superficie, pero apenas arraigada)	El desmonte esta descubierto sin presencia vegetal	G4/G5
Tratamiento de mejora (mallas, gunitado, bulones, barreras, dinámicas, jet grouting) <sup>3</sup>	El desmonte presenta más del 75% y hasta un 100%	El desmonte presenta más del 50% y hasta un 75%	El desmonte presenta más del 25% y hasta un 50%	El desmonte presenta menos de un 25%	El desmonte no tiene ningún tratamiento de mejora	G1/G2/ G4/G5
Tratamientos de mejora en talud frontal: Presencia de boquillas, viseras y bermas	Se han implementado más de dos de los tratamientos de mejora indicados		Existe algún tratamiento de mejora en el talud frontal		No existe ningún tratamiento de mejora	G1/G2 /G4/G5
Medidas de mejora del drenaje (drenes californianos, drenes en espina de pez u otras)	El desmonte presenta suficientes medidas de drenaje para interceptar el agua		El desmonte presenta medidas de drenaje para interceptar el agua		El desmonte no tiene medidas para interceptar el agua	G4/G5

<sup>19</sup> En la tabla se hace una propuesta preliminar de carácter genérico. Pero, los aspectos a considerar en la tipología de material dependerán de la zona de estudio, pudiendo ser revisados caso a caso.

Aspectos a considerar:

- Presencia de suelos expansivos
- Presencia de arcillas
- Ángulo de rozamiento interno y resistencia al corte de los suelos empleados
- Resistencia mecánica de las rocas
- Grado de meteorización del talud

ANEJOS

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Erosión (desmonte en suelo)	Sin presencia de erosión	Se observa erosión leve (inferior al 20%) en el desmonte	Se observa erosión moderada (al menos en el 20%) en el desmonte (pequeños surcos)	Se observa alta erosión (entre el 20 y el 50%) en el desmonte (surcos grandes asociados con zanjas o cárcavas)	Se observa muy alta erosión (más del 50% de la superficie) en el desmonte (zanjas y cárcavas)	G4/G5
Grado de meteorización o disgregación (desmonte en roca)	No se presentan desprendimientos en el desmonte	El desmonte presenta pequeños desprendimientos, que son de fácil limpieza	El desmonte presenta desprendimientos con tamaños entre los 30 y 60 cm. Se requiere equipo para el mantenimiento	El desmonte presenta desprendimientos con tamaños que oscilan entre los 60 y 150 cm. Se requiere maquinaria para el mantenimiento	El desmonte presenta desprendimientos mayores a 1,50 metros y presencia de escombros. Se requiere mantenimiento mayor del corte	G1
Infiltración / Presencia de agua	El desmonte no presenta humedad	El desmonte presenta humedad	El desmonte se encuentra saturado	El desmonte presenta pequeñas surgencias o goteo de agua	El desmonte presenta surgencias de agua	G4/G5
Cuneta de pie (distancia del talud lateral a la plataforma)	Más de 5 metros	Entre 3 y 5 metros	Entre 1 y 3 metros	Menos de 1 metro	No hay distancia	G1/G4/G5

2. **En el interior del túnel:**

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Código de Impacto
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Tipo de Revestimiento	Dovelas prefabricadas y/o hormigones de alta resistencia		Hormigón in situ con encofrados con chapas metálicas		Hormigón proyectado	D1
Existencia de deterioros en revestimiento	No hay deterioro del revestimiento		Revestimiento algo deteriorado		Revestimiento muy deteriorado	D1



## ANEJO 6. MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE AFECCIÓN A MOVILIDAD Y SEGURIDAD

### Identificación preliminar de impactos

La movilidad se puede ver mermada por distintas variables ambientales. Bien de manera directa (por ejemplo, lluvia intensa, granizo, nieve, hielo, niebla, viento) o bien de manera indirecta por la afectación de los distintos activos (por ejemplo, presencia de obstáculos en la calzada por caída de piedras del desmonte, etc).

Se propone tener en cuenta los siguientes impactos:

Tipo de impacto	Código	Nombre del impacto	Procesos relacionados
Tráfico y Operación. Seguridad vial	O1	Afección a la circulación por presencia de obstáculos en la calzada (caída de materiales)	Ver impactos geotécnicos en obras de tierra desmontes y en túneles. Otros obstáculos que pueden aparecer en el firme son: caída de señales
	O2	Afección a la circulación por niebla	Estado de las marcas viales y de la señalización vertical. Existencia de elementos especiales de señalización. Zona propensa a las nieblas
	O3	Afección a la circulación por precipitaciones intensas (incluida agua procedente de torrenteras y rebase de ODTs)	Precipitaciones intensas. Presencia de torrenteras. Rebase de ODT o estructuras. Posible efecto pantalla por la existencia de otras infraestructuras lineales que actúe como pantalla
	O4	Afección a la circulación por nieve	Nieve. Temperaturas mínimas por debajo de 0°C
	O5	Afección a la circulación por hielo	Hielo. Temperaturas mínimas por debajo de 0°C
	O6	Afección a la circulación por viento	Viento.
	O7	Disminución de la seguridad de la vía por acumulación de agua en el pavimento debido a precipitaciones intensas	Tipo de betún, tipo de mezcla, drenabilidad de mezcla, estado superficial del pavimento, condiciones de drenaje de la calzada, precipitación intensa
	O8	Afección a seguridad de la circulación a la salida de túnel	Características del trazado a la salida del túnel. Tipo de firme a la salida del túnel. Existencia de paneles informativos en el interior del túnel. Señalización

### Identificación de amenazas relacionadas

*Nota: Siempre que sea posible se tendrán en cuenta las proyecciones de las variables consignadas como amenazas, tal y como se explica con detalle en el cuerpo de la metodología.*

Amenaza/variable/Índice Impacto	Precipitación máxima (1, 3, 6, 12 y 24h)	Precipitación máxima acumulada en 5 días	Máximo nº días consecutivos precipitación <1 mm	Amplitud térmica	Temperatura máxima extrema	Temperatura mínima extrema	Inundaciones (t 10, 100 y 500 años)	Velocidad máxima del viento
O1	X	X	X	X			X	
O2								

ANEJOS

Amenaza/ variable/ Índice Impacto	Precipitación máxima (1, 3, 6, 12 y 24h)	Precipitación máxima acumulada en 5 días	Máximo nº días conse- cutivos precipitación <1 mm	Amplitud térmica	Tempera- tura má- xima extrema	Tempera- tura mínima extrema	Inundacio- nes (t 10, 100 y 500 años)	Velocidad máxima del viento
O3	X	X	X				X	
O4	X	X	X			X		
O5	X	X	X			X	X	
O6								X
O7	X	X	X				X	
O8	X	X	X				X	X

**Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de la afección a la movilidad y a la seguridad vial**

*Nota: Los impactos y sus consecuencias, y por tanto los niveles de sensibilidad consignados en esta matriz dependen de las características particulares de la infraestructura. No obstante, la tabla recoge una propuesta genérica. Se trata de un ejemplo básico orientativo para que en cada caso se pueda hacer una propuesta específica, pudiéndose ampliar para hacerlo más detallado.*

**Sobre el Tráfico y la Operación y la Seguridad Vial**

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Clasificación
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Existencia de sistemas de gestión y de alerta para el usuario	Existen sistemas de alerta con buen funcionamiento		Existen sistemas de alerta con funcionamiento mejorable		No existen sistemas de alerta	O1-O8
Número de carriles	Más de dos carriles		Dos carriles		Un carril	O1-O8
Existencia de arcén derecho	Más de 1,5 m de arcén		Arcén de 1 m		Sin arcén	O1-O8
ITS (Sistemas Inteligentes de Transporte)	Existencia de ITS		Existe algún elemento informativo		No existen ITS	O1-O8
Distancia al centro de conservación más cercano (indicando si cuenta con equipos de vialidad invernal)	Este factor de sensibilidad pretende englobar los aspectos que facilitarían la vialidad en caso de que se produjera una afección a la circulación motivada por una lluvia intensa, una nevada o un incendio (entre otros). Se trata de identificar los elementos que permitirían retirar los vehículos de la carretera (zonas de detención segura, aparcamientos de vialidad invernal) o que facilitarían la llegada de servicios de conservación, equipos de vialidad invernal, emergencias, protección civil u otros. Dada la magnitud de este criterio, es ciertamente difícil asignar umbrales. Se considera que sería necesario conocer los protocolos de actuación frente a emergencias de las distintas CCAA, unidades provinciales para poder valorar adecuadamente ese factor.					O1-O8
Existencia de taludes sensibles	Sensibilidad baja		Sensibilidad media		Sensibilidad alta	O1

METODOLOGÍA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CARRETERAS

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Clasificación
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
a la caída de materiales <sup>20</sup>						
Presencia de elementos de protección frente a desprendimientos (mallas, cunetones u otros) <sup>21</sup>	Existencia de elementos de protección adecuados		Existencia de algún elemento que pueda aportar cierta protección		Inexistencia de elementos de protección	O1
Caída de otros elementos (postes, luminarias,...)	No existen elementos que puedan caer a la carretera		Existen elementos que pueden caer a la carretera, pero están en buen estado		Existen elementos que pueden caer a la carretera y su estado de mantenimiento es deficiente	O1
Sistemas anti niebla	Existencia de elementos especiales para facilitar la conducción con niebla		Señalización preventiva de niebla		No existe señalización	O2
Estado de las marcas viales <sup>22</sup>	El estado de las MV es excelente		El estado de las MV es bueno		El estado de las MV no es adecuado	O2
Estado de las señales verticales <sup>23</sup>	El estado de la SV es excelente		El estado de la SV es bueno		El estado de la SV no es adecuado	O2
Existencia de elementos de la carretera que puedan provocar la presencia de láminas de agua en la carretera (rebase de ODTs o aporte de agua procedente de torrenteras) <sup>24</sup>	Sensibilidad baja		Sensibilidad media		Sensibilidad alta	O3

<sup>20</sup> Para la valoración de este factor de sensibilidad se tendrá en cuenta el valor medio de sensibilidad obtenido en la matriz de sensibilidad de obras de tierra desmontes (G1 a G5) o de la matriz de túneles, si procede.

<sup>21</sup> Se tendrán en cuenta solamente aquellos elementos en buen estado de conservación, ya que en caso contrario no serían funcionales.

<sup>22</sup> El estado de las marcas viales se valorará a través de los parámetros establecidos en el artículo 700 del PG-3 (retroreflexión, luminancia y resistencia al deslaminamiento de las marcas viales).

<sup>23</sup> El estado de la señalización vertical se valorará a través de los parámetros establecidos en el artículo 701 del PG-3 (coeficiente de retroreflexión de las señales verticales).

<sup>24</sup> Para la valoración de este factor de sensibilidad se tendrá en cuenta del valor obtenido en la matriz de sensibilidad de obras de tierra taludes para el impacto G5 "Torrenteras" y el valor de sensibilidad de obtenido en la matriz de sensibilidad de las ODT para el impacto S1 "Capacidad hidráulica insuficiente".

ANEJOS

Factor de Sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Clasificación
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
Existencia de elementos de protección frente a la nieve (hitos de arista y/o jalones de nieve)	Existencia de elementos de protección adecuados		Existencia de algún elemento que pueda aportar cierta protección		Inexistencia de elementos de protección	O4
Zona de umbría que afecte a aparición de hielo	Todo el tramo discurre por zona soleada		Existencia de pequeñas zonas de umbría		Existencia generalizada de zonas de umbría	O5
Existencia de elementos de protección frente al viento (barreras contra el viento, mangas)	Existencia de elementos de protección adecuados		Existencia de algún elemento que pueda aportar cierta protección		Inexistencia de elementos de protección	O6
Existencia de protecciones naturales frente al viento	Tramo situado entre desmontes en el que no se producen corrientes				Tramo en el que se producen fuertes corrientes	O6
Sensibilidad del firme a presencia de agua en superficie <sup>25</sup>	Sensibilidad baja		Sensibilidad media		Sensibilidad alta	O7
Configuración de la vía a la salida del túnel (trazado y estado del pavimento)	Trazado recto con buen mantenimiento de pavimento		Salida en curva poco pronunciada y mantenimiento adecuado del pavimento		Salida en curva con mantenimiento insuficiente del pavimento	O8

<sup>25</sup> Para la valoración de este factor de sensibilidad se tendrá en cuenta el valor obtenido en la matriz de sensibilidad de pavimentos para el impacto S1 "Presencia de agua en el pavimento por lluvias intensas".

## ANEJO 7. REGISTRO SISTEMÁTICO DE INCIDENCIAS CLIMÁTICAS

<b>Fecha</b>				
<b>IDENTIFICACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO</b>				
<b>Carretera</b>	<b>P.K.</b>	<b>Coord. X (UTM)</b>	<b>Coord. Y (UTM)</b>	<b>Provincia</b>
<b>DESCRIPCIÓN DEL EVENTO CLIMÁTICO</b>				
<b>Fotografía del evento</b>				
<b>Tipo de evento climático extremo</b>				
<b>Dato(s) climático(s) desencadenante(s)</b>				
<b>Otra información de interés</b>				
<b>AFECCIÓN A LA CARRETERA</b>				
<b>Elemento(s) afectado(s)</b>				
<b>Estado de conservación</b>				
<b>Características del entorno que han favorecido el evento climático (ej: tipo de suelo, cubierta y vegetación, geomorfología de la zona)</b>				
<b>Afección al tráfico (sí/no; duración, itinerarios alternativos, retrasos, etc.)</b>				
<b>Competencia</b>				
<b>Accidentes (sí/no; consecuencias)</b>				

ANEJOS

<b>Protección civil (sí/no; descripción)</b>
<b>ACTUACIONES DE REPARACIÓN</b>
<b>Tipo de reparación</b>
<b>Coste de la reparación (costes de reposición o rehabilitación, costes sociales y coste medioambientales)</b>
<b>OTRA INFORMACIÓN DE INTERÉS</b>
<b>Enlace a noticias</b>
<b>Enlace a fotos</b>
<b>Antecedentes de eventos análogos en la zona. Caracterización de la misma</b>



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE TRANSPORTES  
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

**CEDEX**  
CENTRO DE ESTUDIOS  
Y EXPERIMENTACIÓN  
DE OBRAS PÚBLICAS



**M-146**

P.V.P: 10 €

(I.V.A. Incluido)