

# METODOLOGÍAS Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA DE LAS CARRETERAS AL CAMBIO CLIMÁTICO - ENFOQUE DE CASO DE ESTUDIO

COMITÉ TÉCNICO E.1 *ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN Y RESILIENCIA*



# DECLARACIONES

*La Asociación Mundial de Carreteras (PIARC) es una organización sin ánimo de lucro creada en 1909 para mejorar la cooperación internacional y fomentar el progreso en el campo de las carreteras y el transporte por carretera.*

*El estudio objeto de este informe fue definido en el Plan Estratégico de la PIARC 2016- 2019 y aprobado por el Consejo de la Asociación Mundial de Carreteras, cuyos miembros son representantes de los gobiernos nacionales miembros. Los miembros del Comité Técnico responsable de este informe fueron nombrados por los gobiernos nacionales miembros por sus competencias especiales.*

*Todas las opiniones, hallazgos, conclusiones y recomendaciones expresadas en esta publicación son de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de sus organizaciones o agencias matrices.*

*Este informe está disponible en el sitio web de la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC): <http://www.piarc.org>*

*Derechos de autor por la Asociación Mundial de Carreteras. Todos los derechos reservados.*

*Asociación Mundial de Carreteras (PIARC)*

*Arche Sud 5° niveau 92055*

*La Défense CEDEX, FRANCIA*

*Número Internacional Estándar del Libro: 978-2-84060-602-4*

*Portada © Cerema*

# **METODOLOGÍAS Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA DE LAS CARRETERAS AL CAMBIO CLIMÁTICO – UN ENFOQUE BASADO EN CASOS DE ESTUDIO**

**COMITÉ TÉCNICO E.1 *ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN Y  
RESILIENCIA***

## AUTORES / AGRADECIMIENTOS

El presente informe ha sido preparado por el grupo de trabajo 1 del Comité Técnico E.1: *Estrategias de adaptación y resistencia* de la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC).

Los contribuyentes a la preparación de este informe son:

Caroline Evans (Australia)

Fabien Palhol (Francia)

Marie Colin (Francia)

Jürgen Krieger (Alemania)

Beata Krieger (Alemania)

Roland Gschier (Austria)

Eric Locquet (Francia)

Juan Fernando Mendoza (México)

Gordana Petkovic (Noruega)

Sarah J. Reeves (Reino Unido)

Rebecca Lupes (Estados Unidos)

Shinri Sone (Japón)

Hind Bendidi (Marruecos)

Jie Guo (China)

La presente versión en español fue elaborada por Juan Fernando Mendoza Sánchez (México). La edición en inglés fue dirigida por Caroline Evans (Australia). La traducción al francés de la versión original fue realizada por Fabien Palhol y Marie Colin (Francia).

Los líderes del Grupo de Trabajo 1, fueron Caroline Evans (Australia) y Fabien Palhol (Francia), dentro del Comité Técnico, quienes son también responsables del control de calidad para la producción de este informe.

El Comité Técnico estuvo presidido por Jürgen Krieger (Alemania) y April Marchese (Estados Unidos de América), Juan Fernando Mendoza Sánchez (México) y Eric Dimnet (Francia), respectivamente, que fueron los secretarios de habla inglesa, española y francesa.

## METODOLOGÍAS Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA DE LAS CARRETERAS AL CAMBIO CLIMÁTICO - UN ENFOQUE BASADO EN CASOS DE ESTUDIO

Se prevé que el cambio climático tendrán repercusiones significativas en el diseño, la construcción, el mantenimiento y la operación de la infraestructura carretera a nivel global. Las proyecciones sobre el cambio del clima del PICC<sup>1</sup> estiman que la tierra se calentará, algunas regiones se volverán más húmedas en general y otras más secas, el nivel del mar aumentará y la altura del oleaje aumentará, la cobertura de nieve y la extensión del hielo marino se reducirán, y la frecuencia y severidad de los eventos climáticos extremos aumentarán. Esto, a su vez, dará lugar a importantes desafíos mundiales y regionales relacionados con el cambio climático, tanto a corto como a largo plazo [1].

El Marco Internacional para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera desarrollado por la PIARC[4] guía a las autoridades carreteras en el proceso para aumentar la resiliencia al cambio climático de sus redes y activos carreteros a través de cuatro etapas: Identificar el alcance, las variables, los riesgos y los datos (Etapa 1); Evaluar y priorizar los riesgos (Etapa 2); Desarrollar y seleccionar respuestas y estrategias de adaptación (Etapa 3); Integrar los hallazgos en los procesos de toma de decisiones (Etapa 4).

Dentro del Comité Técnico E.1 de la PIARC, se establecieron dos Grupos de Trabajo.

**El Grupo de Trabajo 1 (GT1)** tiene la tarea de llevar a cabo un análisis de casos de estudio sobre el estado actual de las estrategias de adaptación que permiten aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera, ya sea a nivel de políticas, estrategias, o acciones específicas en proyectos o en el sistema carretero. Esto incluye la consideración de:

Datos requeridos relativos a la adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático

Evaluación de la vulnerabilidad y la criticidad de la infraestructura carretera

Medidas de adaptación a las posibles amenazas derivadas del cambio climático; y

Análisis costo-beneficio de la adaptación al cambio climático.

El Informe del GT1 proporciona los detalles metodológicos que respaldan cada etapa del Marco Internacional para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera, remitiéndose a ejemplos de casos de estudio de acuerdo al estado del arte actual.

**El Grupo de Trabajo 2 (GT2)** tuvo la tarea de examinar los casos de estudio recopilados y otras experiencias pertinentes, para proponer mejoras a la edición original del Marco Internacional para Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera. El Marco se ha aplicado sistemáticamente sólo en dos lugares, en México y en Queensland (Australia). La experiencia de esta aplicación, junto con una comparación con otros marcos existentes, proporcionó información sobre el contenido de las etapas del Marco y la forma en que pueden mejorarse.

---

<sup>1</sup> Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático del PICC, [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

# RESUMEN EJECUTIVO

Adicionalmente el GT2 investigó posibilidades para mejorar el Marco con el fin de ampliar su aplicabilidad. Una de las razones de ello fue que el Marco parece ser una aportación útil para ayudar a los países que no tienen experiencia previa en la realización de trabajos de adaptación. Por lo tanto, se proponen algunos atajos en el procedimiento para incorporar una evaluación inicial de la vulnerabilidad y una evaluación de riesgos en la fase de planificación de un proyecto de carreteras.

Otra razón para querer extender la aplicabilidad del Marco es el hecho de que algunos países ya aplican una metodología para la evaluación de riesgos, aunque ésta puede ser diferente de la que se encuentra en el Marco. Por lo tanto, se proponen algunos ajustes para que los países puedan beneficiarse de la estructura del Marco y combinarla con sus propias metodologías establecidas para la evaluación de riesgos.

El Informe del GT1 proporciona los detalles metodológicos que respaldan cada etapa del Marco Internacional para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera de la PIARC, remitiéndose a ejemplos de casos de estudio de acuerdo al estado del arte actual. También el Informe del GT2 investiga las posibles aplicaciones del Marco y discute las necesidades y opciones para su perfeccionamiento.

El grupo de trabajo sobre la compilación de casos de estudio se basó en 59 estudios recopilados y clasificados que fueron analizados y clasificados por un grupo de trabajo interno del Comité Técnico (CT). Además, al poner a disposición más de 100 casos de estudio en total, el trabajo del CT E.1 representa una consolidación completa de los conceptos de vanguardia aplicables a la adaptación al cambio climático en las carreteras. Estas referencias detalladas también pueden ser utilizadas como puntos de referencia para otros proyectos que se están llevando a cabo en todo el mundo. En este contexto, es fundamental que los productos de la PIARC representen un valor añadido significativo para los propietarios y operadores de infraestructuras carreteras y que tengan un punto de referencia único, al permitir que se tengan en cuenta una amplia gama de casos de estudios para considerar la práctica más avanzada en todo el mundo.

Existe la capacidad de ampliar el trabajo desarrollado por el CT E.1 para formular una nueva edición del Marco de la PIARC. Se reconoce que el trabajo del CT E.1 está muy interrelacionado entre ciclos, por lo que se basa en el ciclo anterior, en el ciclo actual y puede extenderse al siguiente ciclo de la PIARC para 2020-2023. Por lo tanto, es necesario que la transferencia de conocimientos en tres ciclos consecutivos sea coherente.

# CONTENIDO

|                                                                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>                                                                                                 | <b>3</b>  |
| <b>2. OBJETO DEL INFORME.....</b>                                                                                            | <b>5</b>  |
| <b>3. ESTRUCTURA DEL PRESENTE INFORME .....</b>                                                                              | <b>6</b>  |
| <b>4. PANORAMA GENERAL DEL MARCO INTERNACIONAL PARA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA .....</b> | <b>7</b>  |
| 4.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MARCO DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA PIARC EN MÉXICO.....                                   | 9         |
| 4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MARCO DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA PIARC EN AUSTRALIA .....                               | 10        |
| 4.3. IMPLEMENTACIÓN DEL MARCO DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA PIARC EN PARAGUAY.....                                 | 10        |
| <b>5. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN .....</b>                                                | <b>11</b> |
| 5.1. RECOPIACIÓN DE CASOS DE ESTUDIO .....                                                                                   | 11        |
| 5.2. METODOLOGÍA DEL GRUPO DE TRABAJO .....                                                                                  | 11        |
| 5.3. RESULTADOS DEL GRUPO DE TRABAJO .....                                                                                   | 12        |
| 5.4. ENFOQUE PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CASOS DE ESTUDIO .....                                                                | 12        |
| <b>6. REQUISITOS DE INFORMACIÓN Y CONTEXTO PARA LA APLICACIÓN DE LAS DIRECTRICES.....</b>                                    | <b>13</b> |
| 6.1. DEFINICIONES .....                                                                                                      | 13        |
| 6.2. DEFINIR LOS OBJETIVOS Y EL ALCANCE DE UNA EVALUACIÓN HOLÍSTICA DE RIESGOS .....                                         | 14        |
| 6.3. ASESORAMIENTO PRÁCTICO PARA LLEVAR A CABO UNA EVALUACIÓN HOLÍSTICA DEL RIESGO .....                                     | 16        |
| 6.4. VISIÓN GENERAL DE LAS METODOLOGÍAS PARA EVALUAR LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO .....                                | 18        |
| <b>7. EVALUACIÓN DE EXPOSICIÓN .....</b>                                                                                     | <b>20</b> |
| 7.1. DEFINICIÓN DE LA EXPOSICIÓN AL CLIMA .....                                                                              | 20        |
| 7.2. SELECCIÓN DE LOS PELIGROS CLIMÁTICOS .....                                                                              | 21        |
| 7.3. SELECCIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO .....                                                                       | 23        |
| 7.4. VALORACION DE LA EXPOSICION .....                                                                                       | 26        |

|                                                                                                                                                 |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>8. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS NECESARIOS PARA EVALUAR LA SENSIBILIDAD, LA VULNERABILIDAD GENERAL Y LA CRITICIDAD.....</b>                       | <b>29</b> |
| 8.1. EVALUACION DE LA SENSIBILIDAD .....                                                                                                        | 29        |
| 8.2. EVALUACION DE LA CRITICIDAD .....                                                                                                          | 34        |
| <b>9. ¿CÓMO SE APLICA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS? .....</b>                                                                                       | <b>41</b> |
| 9.1. ENFOQUE DESCENDENTE (TOP-DOWN).....                                                                                                        | 43        |
| 9.2. ENFOQUES BASADOS EN INDICADORES.....                                                                                                       | 44        |
| 9.3. ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS, EVALUACIÓN Y ENFOQUE PROBABILÍSTICO PARA EL ANÁLISIS DE RIESGOS .....                                    | 46        |
| <b>10. SELECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE LAS MEDIDAS Y RESPUESTAS DE ADAPTACIÓN .....</b>                                                              | <b>49</b> |
| 10.1. LA DETERMINACIÓN DE LOS TIPOS DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN.....                                                                               | 49        |
| 10.2. EVALUACIÓN DE LA EFICACIA/SEGUIMIENTO DE LAS MEDIDAS DE ADAPTACIÓN .....                                                                  | 74        |
| <b>11. ENFOQUES PARA INCLUIR LA ADAPTACIÓN EN LA VALORACIÓN Y EVALUACIÓN .....</b>                                                              | <b>77</b> |
| 11.1. METODOLOGIAS ECONOMICAS .....                                                                                                             | 77        |
| 11.2. PRIORIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE OPCIONES DE RESILIENCIA.....                                                                                 | 85        |
| 11.3. DESARROLLAR UN PLAN DE ACCIÓN DE ADAPTACIÓN Y VERIFICAR LA RENTABILIDAD DE LAS MEDIDAS A POSTERIORI Y LA REALIZACIÓN DE LOS BENEFICIOS .. | 93        |
| <b>12. CONCLUSIONES .....</b>                                                                                                                   | <b>94</b> |
| <b>13. BIBLIOGRAFÍA / REFERENCIAS .....</b>                                                                                                     | <b>95</b> |
| <b>14. GLOSARIO.....</b>                                                                                                                        | <b>99</b> |

## 1. INTRODUCCIÓN

Las redes de transporte son fundamentales para nuestra sociedad. El transporte proporciona los servicios de movilidad y accesibilidad, y su objetivo es proporcionar servicios consistentes y confiables. Sin embargo, la red de transporte es vulnerable a los impactos de muchos factores externos que pueden obstaculizar su capacidad para proporcionar los niveles de servicios diseñados previamente.

Es necesario identificar la vulnerabilidad de la infraestructura de transporte para aumentar la resiliencia de la red de transporte. Según el Proyecto de Investigación de la Unión Europea: "Realising European RESILience for Critical INfraStructure", define a la "Resiliencia" como la capacidad de sobrevivir frente a un futuro complejo, incierto y en constante cambio. Es una forma de pensar sobre los ciclos a corto plazo y las tendencias a largo plazo. Como resultado, un sistema resiliente debe incluir la noción de que la resiliencia de la sociedad ante los desastres es igual a la capacidad de la sociedad para reducir:

- probabilidades de falla de la infraestructura,
- consecuencias directas o indirectas de las fallas, en términos de vidas perdidas, daños y consecuencias económicas y sociales negativas,
- tiempo de recuperación (restauración de un sistema específico o conjunto de sistemas a su nivel "normal" de rendimiento funcional) [2; en 3].

La reducción de la vulnerabilidad de la infraestructura (y el aumento de su resiliencia) es de fundamental importancia para la planificación del transporte actual y futuro. Se requiere orientación sobre cómo evaluar los impactos que los proyectos pueden tener en la reducción de la vulnerabilidad de los elementos estratégicos de las redes y las compensaciones involucradas. Esto implica el desarrollo de infraestructura más resiliente que pueda soportar de mejor manera todo tipo de amenazas. Esto también ayudará en apoyar en la prestación de servicios esenciales de forma continua a las empresas, los gobiernos y la comunidad, así como a otros sectores (en gran parte proporcionados por infraestructura que es crítica).

Durante el ciclo 2012-2015 del Plan Estratégico de la Asociación Mundial de Carreteras, en 2014 el Comité Técnico (CT) 1.3 "Cambio Climático y Sustentabilidad", desarrolló una propuesta para el desarrollo de "Proyecto Especial" mediante el cual se desarrollará un Marco internacional para la adaptación al cambio climático. El Marco Internacional para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera de la PIARC [4] (denominado en este informe "Marco de la PIARC") fue desarrollado para guiar a las autoridades viales en la identificación de activos y variables climáticas relevantes para la evaluación, la identificación y priorización de riesgos ante el cambio climático, así como el desarrollo de respuestas de adaptación sólidas y la integración de los resultados en los procesos de toma de decisiones. Además, el Marco proporciona un enfoque iterativo y de ciclo de vida para la adaptación al cambio climático [4].

Como parte del ciclo actual, el Comité Técnico E.1 (CT E.1) "*Estrategias de Adaptación y Resiliencia*" han tratado intensamente las siguientes temas de acuerdo con los requisitos del Plan Estratégico de la PIARC:

- Investigación y difusión de información sobre las estrategias de adaptación actuales para aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera (Grupo de Trabajo 1).

- Perfeccionamiento del Marco de Adaptación al Cambio Climático (basado en el "Proyecto Especial" desarrollado en el ciclo 2011-2015) y seguimiento de su implementación (Grupo de Trabajo 2).

El trabajo sobre estos dos temas se basó en 59 casos de estudio que fueron analizados y clasificados por un grupo de trabajo interno del CT. Al final del ciclo de trabajo, se captaron más de 100 casos de estudio disponibles.

Este informe consolida las conclusiones de este grupo de trabajo interno. Sin embargo, se reconoce que, debido al gran volumen de casos de estudio recopilados, no todos pudieron ser incorporados en este informe. Por lo tanto, este informe muestra tantos casos de estudio relevantes como sea posible. Se puede hacer referencia al informe del Grupo de Trabajo en relación con otros ejemplos de casos de estudio.

El propósito de este informe es articular la tarea del GT1 y destacar un análisis de casos de estudio de vanguardia de las estrategias de adaptación para aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera a nivel de políticas, estrategias, de sistema y de proyectos específicos. Se ha desarrollado en paralelo con la tarea del GT2, que consistió en perfeccionar el Marco de la PIARC, el cual proviene del trabajo desarrollado en el ciclo anterior. Este informe describe los detalles metodológicos que respaldan cada etapa del Marco de la PIARC; por lo tanto, tanto los resultados del GT1 como del GT2 están muy relacionados entre sí. Este informe para el GT1 incluye ejemplos de los casos de estudio más recientes de las cuatro principales áreas de los Términos de Referencia (TdR) de la PIARC para el CT E.1:

- Requisitos de datos relativos a la adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático.
- Evaluación de la vulnerabilidad y de la criticidad de la infraestructura carretera.
- Medidas de adaptación a las posibles amenazas derivadas del cambio climático.
- Análisis costo-beneficio de la adaptación al cambio climático.

Estas áreas antes mencionadas han sido presentadas en este informe a través de casos de estudio sobre el estado del arte de las estrategias de adaptación y la resiliencia.

## 2. OBJETO DEL INFORME

El Plan Estratégico de la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC) se divide en cinco temas, uno de los cuales es el Tema Estratégico E: Cambio Climático, Medio Ambiente y Desastres. El objetivo de este Tema Estratégico es aumentar la resiliencia y proteger las inversiones en infraestructura de transporte de los impactos de los eventos del cambio climático y, al mismo tiempo, disminuir el impacto del transporte por carretera en el medio ambiente. Este Tema Estratégico incluye tres Comités Técnicos, uno de los cuales es el Comité Técnico E.1: *Estrategias de adaptación y resiliencia*.

Las actividades del CT E.1 se dividieron en dos grupos de trabajo y un grupo de trabajo. El programa de trabajo abordó dos estrategias:

- Grupo de Trabajo 1 (GT1) - Investigar y difundir información sobre las estrategias de adaptación actuales para aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera – Elaborar un informe basado en casos de estudio.
- Grupo de Trabajo 2 (GT2) - Perfeccionar el Marco Internacional para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera (basado en el Proyecto Especial desarrollado en el ciclo 2011-2015) y dar seguimiento a su implementación - Elaborar un informe basado en casos de estudio.

También se creó un grupo de trabajo interno que recopiló casos de estudios que proporcionaron información sobre la adaptación de las carreteras al cambio climático.

Este informe detalla la salida del GT1. Complementa directamente el perfeccionamiento del Marco investigado por el GT2, en el que el informe del GT1 proporciona los detalles metodológicos que respaldan cada una de las etapas del refinado Marco Internacional para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera.

### 3. ESTRUCTURA DEL PRESENTE INFORME

Este informe fue estructurado de acuerdo con las principales secciones del Marco, tales como: requerimientos de datos, evaluación de la exposición, evaluación de la vulnerabilidad y la criticidad de las carreteras, medidas de adaptación y los enfoques económicos para evaluar qué medidas de adaptación proporcionan las respuestas más rentables. Además, se discuten otras secciones que proporcionan una conexión entre este trabajo y la mejoras al Marco Internacional para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera de la PIARC y de la información recabada por el Grupo de Trabajo de Casos de estudio E.1.

La sección 4 ofrece una visión general del Marco Internacional para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera de la PIARC e identifica las principales etapas de dicho Marco. Esto incluye la vinculación con el trabajo del GT2.

La sección 5 detalla el proceso de recolección de información necesaria para desarrollar este informe. En él se esboza la metodología y los resultados del Grupo de Trabajo Interno del Comité Técnico, que fue un componente importante a la hora de proporcionar la información sobre los casos de estudio para este informe. Además, se presenta la metodología utilizada para integrar los resultados de estos casos de estudio en cada sección de este informe.

Las secciones 6 y 7 identifican los requisitos de información y el contexto para aplicar este documento en referencia al Marco de la PIARC. La sección 6 establece la identificación de los objetivos y el alcance para la implementación del Marco de la PIARC. posteriormente, la Sección 7 esboza el concepto de evaluación de la exposición, desde la selección de los peligros climáticos y los escenarios de cambio climático hasta la calificación de la exposición.

En la Sección 8 se presentan técnicas detalladas y ejemplos de casos de estudio para realizar evaluaciones de la vulnerabilidad y la criticidad, y la Sección 9 abarca la aplicación de las evaluaciones de riesgos mediante enfoques descendentes, enfoques basados en indicadores y enfoques cuantitativos y probabilísticos.

En la sección 10 se destacan ejemplos de casos de estudio que permitan identificar, seleccionar, supervisar y evaluar las medidas de adaptación y las respuestas relacionadas con la infraestructura, la gestión del tránsito y de desastres, el mantenimiento, la operación o la planificación.

En la sección 11 se definen las formas de incluir las medidas de adaptación en la valoración y evaluación de los proyectos. Esto incluye metodologías económicas como el análisis costo-beneficio o la evaluación del ciclo de vida, así como metodologías para la priorización de las opciones de adaptación para aumentar resiliencia carretera. Esta sección también describe cómo desarrollar un plan de acción de adaptación y verificar la realización de beneficios y la integración de la adaptación al cambio climático en los procesos de toma de decisiones. Todas las secciones del informe se complementan con descripciones de las prácticas más avanzadas o ejemplos pertinentes derivados de los casos de estudios analizados para la elaboración del presente informe.

## 4. PANORAMA GENERAL DEL MARCO INTERNACIONAL PARA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA

De acuerdo al Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (PICC), se reconoce que las temperaturas medias mundiales seguirán aumentando en el siglo XXI si las emisiones de gases de efecto invernadero no disminuyen, y también que los efectos no serán uniformes a nivel regional. Además, las precipitaciones mundiales a largo plazo aumentarán; se prevé que la temperatura media mundial de la superficie y la evaporación anual de la superficie aumenten a medida que las temperaturas mundiales se incrementen en la mayor parte de los océanos. Se proyectan cambios sobre la tierra siguiendo un patrón similar al de la precipitación. El PICC señala que las proyecciones del cambio climático son inciertas, principalmente porque dependen de los escenarios de las futuras fuerzas antropogénicas y naturales que también son inciertas. Además hay inconsistencias debido a modelos incompletos e imprecisos sobre los sistemas climáticos y de la variabilidad climática interna. Sin embargo, es posible entender el cambio climático futuro utilizando modelos para caracterizar los resultados y las incertidumbres bajo suposiciones específicas sobre los escenarios futuros esperados [1].

Se prevé que las principales proyecciones del PICC sobre el cambio climático tendrán repercusiones significativas en el diseño, la construcción, el mantenimiento y la operación de la infraestructura carretera en todo el mundo. Estas proyecciones estiman que la tierra se calentará, algunas regiones se volverán más húmedas en general y otras más secas, el nivel del mar aumentará y la altura de las mareas de tormenta incrementarán, la cobertura de nieve y la extensión del hielo marino se reducirá, y la frecuencia y gravedad de los fenómenos meteorológicos extremos se amplificará.

Como se discutió en la Sección 1, teniendo en cuenta los riesgos y oportunidades del cambio climático, la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC) desarrolló un Marco para guiar a las autoridades viales a través de la identificación de activos y variables climáticas relevantes para la evaluación, la identificación y priorización de riesgos, el desarrollo de una respuesta de adaptación sólida y la integración de los resultados de la evaluación en los procesos de toma de decisiones.

El Marco Internacional para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera de la PIARC guía a las autoridades viales a través del proceso mediante el cual podrán aumentar la resiliencia (sólo el cambio climático) de sus redes y activos, a través de las siguientes etapas:

- Etapa 1 - Identificación del alcance, variables, riesgos y datos
- Etapa 2 - Evaluación y priorización de riesgos
- Etapa 3 - Desarrollo y selección de respuestas y estrategias de adaptación
- Etapa 4 - Integración de los hallazgos en los procesos de toma de decisiones.

La primera etapa tiene cuatro componentes principales: establecer el alcance de la evaluación, los objetivos, las tareas y un plan para la implementación; evaluar la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación; evaluar las proyecciones y los escenarios del cambio climático; y definir cual será el resultado esperado. Típicamente, el objetivo y el rumbo detrás de la realización de cualquier tipo de evaluación de la adaptación al cambio climático es asegurar y mejorar la resiliencia de la red, el activo, la operación o el servicio ante los efectos del cambio climático y el clima extremo. Esto se logrará evaluando la exposición, evaluando la sensibilidad, calculando los niveles de vulnerabilidad, evaluando la capacidad de adaptación y, evaluando las proyecciones y los escenarios de cambio

climático. El resultado es que las autoridades viales podrán tener el alcance, los objetivos, las tareas y un plan de implementación definidos y habrán identificado qué activos, ubicaciones y operaciones son más vulnerables, determinado los efectos climáticos relevantes y tendrán conocimientos sobre cómo aplicar los escenarios y las proyecciones del cambio climático.

La segunda etapa tiene cuatro componentes: evaluación de la probabilidad de impacto; evaluación de la severidad del impacto; establecimiento de la calificación de riesgo y registro de riesgos; y el resultado (niveles de riesgo). Esta etapa permitirá a las autoridades comprender y, en la medida de lo posible, cuantificar los riesgos que se plantean para sus redes y activos de una manera simplista, accesible, iterativa y, sin embargo, sólida y holística, siguiendo los principios de la evaluación de riesgos. Las autoridades viales podrán clasificar sus activos, ubicaciones y operaciones de acuerdo con el nivel de probabilidad y/o severidad del riesgo asociado con el cambio climático y el clima extremo. A los efectos de este Marco, se considera que el riesgo es una función de probabilidad y severidad. Al final las autoridades viales tendrán desarrollada una lista de riesgos clasificados de acuerdo con su probabilidad de ocurrencia y la severidad del impacto. Los riesgos con una mayor puntuación deberían pasar a la tercera etapa, la cual describe cómo pueden identificarse, seleccionarse y priorizarse las respuestas de adaptación para hacer frente a estos riesgos.

La tercera etapa también sigue un proceso de cuatro pasos, que incluyen: la identificación de las respuestas y estrategias de adaptación; la selección y priorización de las respuestas y estrategias de adaptación; el desarrollo de un plan o estrategia de acción para la implementación de las respuestas de adaptación; y el resultado (lista de acciones de adaptación priorizadas). La identificación de las respuestas y oportunidades de adaptación se realiza a través del criterio experto, la experiencia y el conocimiento local de la red de carreteras - las autoridades deben ser capaces de producir una lista de posibles respuestas de adaptación adaptadas a su evaluación y a su red de carreteras. La selección y priorización de las respuestas y oportunidades de adaptación se realiza a través de dos métodos comunes: Análisis de Costo-Beneficio (ACB) y el Análisis Multicriterio (AMC). En esta fase de la evaluación, las autoridades viales dispondrán de una lista de posibles respuestas de adaptación a los principales riesgos a los que se enfrentan sus activos carreteros en la red, durante la operación y en el sitio. El resultado de esta etapa es que las autoridades viales podrán desarrollar una lista priorizada de respuestas de adaptación que pueden ir acompañadas de un plan de acción para facilitar la implementación de estas actividades. En la cuarta etapa se describe cómo se puede incorporar cada uno de estos resultados en la toma de decisiones, la educación, la concientización y la capacitación a través de una comunicación eficaz.

La cuarta etapa tiene cuatro pasos principales: incorporar las recomendaciones en los procesos de toma de decisiones; educación, concientización, capacitación y comunicación efectiva; desarrollar un modelo de negocio; y definir la planificación y el monitoreo futuro. El cambio climático debe considerarse como uno de los muchos riesgos que requieren atención en la toma de decisiones sobre el transporte, y no como una cuestión independiente. Las autoridades viales pueden incorporar los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático en: planes de gestión de activos, inventarios y políticas; estrategias de paisaje; estrategias de gestión del tránsito; planes de inversión; normas y especificaciones de diseño; procesos para el manejo de emergencias y riesgos; planes de mitigación de riesgos; criterios de selección de proyectos en la planificación del transporte; o revisiones y estrategias ambientales. El resultado de esta etapa es la integración efectiva de los resultados de la evaluación en las actividades de toma de decisiones, en los planes

de comunicación, en las actividades del modelo de negocio, en los procedimientos operativos y en la planificación en curso.

En resumen, el Marco de la PIARC se desarrolló a través de una amplia investigación y consulta con las autoridades viales de todo el mundo y sintetiza con base en evidencia las prácticas y los conocimientos más avanzados disponibles a nivel internacional. Además, se trata de una herramienta directa, eficaz y utilizable para cualquier autoridad vial, independientemente de las condiciones geográficas, climáticas, económicas o medioambientales, y es aplicable a cualquier escala (por ejemplo, nacional, regional, local o específica en activos).

#### **4.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MARCO DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA PIARC EN MÉXICO**

Posterior a la publicación del Marco de la PIARC, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México llevó a cabo la implementación de este trabajo en la red de carreteras federales en cinco estados del país.

De acuerdo con las etapas del Marco, en la Etapa 1 se estableció el objetivo, el cual incluía la evaluación del riesgo de la red de carreteras frente a fenómenos hidrometeorológicos extremos asociados al cambio climático. El ámbito de aplicación incluía toda la red de carreteras libres de peaje en los 5 Estados de estudio. Se establecieron actividades y productos intermedios, incluida una guía para el uso del Marco. Esto implicó ciertos ajustes en el Marco de la PIARC, en particular en los umbrales para determinar los niveles de vulnerabilidad y riesgo, así como un informe detallado de la vulnerabilidad de la red de carreteras por Estado y una base de datos georreferenciada de los sitios de riesgo.

En cuanto a la identificación de sitios, se desarrolló un procedimiento de trabajo en campo y formatos de registro. Una vez identificados y registrados los sitios, se determinaron los niveles de vulnerabilidad en todos ellos en función de su exposición y sensibilidad, basados en mapas de amenazas/peligro y el criterio de experto de los ingenieros locales.

Una vez determinados los niveles de vulnerabilidad, los sitios con una puntuación alta o muy alta continuaron con el proceso de priorización de riesgos en la Etapa 2 del Marco, donde se evaluó la probabilidad y su severidad del impacto para determinar el nivel de riesgo.

De acuerdo con el nivel de riesgo, los sitios que determinados como los de mayor riesgo, continúan en la Etapa 3 del Marco. Para cada sitio en riesgo, se determinó su medida de adaptación, la cual debe ser evaluada a través de un AMC utilizando los criterios establecidos en el Marco para priorizar las respuestas de adaptación.

Finalmente, se desarrolló un plan para la implementación de las acciones de adaptación, que incluyó la aplicación continua del Marco a la red de carreteras de los estados, la incorporación de las medidas dentro de los programas de conservación de carreteras y la capacitación continua. La capacitación sobre el uso del Marco en México se llevó a cabo a través de varios Talleres, a los que asistieron personal de las dependencias de carreteras, consultores, universidades y otros actores de interés.

El Marco incluye otras actividades en la Etapa 4, que excepto la capacitación y la comunicación, no han sido implementadas en México, como el monitoreo de las medidas de adaptación y el desarrollo de un modelo de negocios.

## **4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MARCO DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA PIARC EN AUSTRALIA**

El Departamento de Transporte y Carreteras Principales (DTCP) de Queensland ha emprendido recientemente un proyecto en el marco de un programa del Centro de Excelencia de Activos Nacionales (NACoE, por sus siglas en inglés) junto con la Oficina de Investigación de Carreteras de Australia (ARRB, por sus siglas en inglés), en relación con la aplicación del Marco de la PIARC. Este proyecto surgió del Taller técnico internacional de la PIARC "Estrategias internacionales de adaptación para aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera", organizado por el DTCP en Brisbane en mayo de 2017, donde se presentó el Marco de la PIARC.

El propósito de este proyecto es desarrollar un Marco consistente para la adaptación al cambio climático del DTCP (que también es aplicable a la industria) basado en los resultados de los proyectos existentes. Esto implica la integración del Marco Internacional para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera de la PIARC y otros enfoques en la práctica actual del DTCP. Además, este proyecto está relacionado con el alcance del CT E.1 / GT1 de la PIARC a través de la integración de casos de estudio de Queensland en este documento y un ejemplo de cómo este Marco internacional puede ser aplicable en Australia y en otros lugares. En el informe del Grupo de Trabajo 2 de la PIARC se ofrecen más detalles.

## **4.3. IMPLEMENTACIÓN DEL MARCO DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA PIARC EN PARAGUAY**

Como resultado de la actualización del Manual de Diseño de Carreteras, la Asociación Paraguaya de la Carretera buscó incluir la adaptación al cambio climático dentro de los criterios y estándares de diseño para las futuras carreteras en Paraguay.

Para facilitar este proceso, a través de la Asociación Mundial de Carreteras y el Instituto Mexicano de Transporte, se realizó un taller sobre la experiencia de México en la aplicación del Marco.

El taller incluyó temas relevantes como la terminología para la adaptación al cambio climático, una visión general de los impactos que se producen en las carreteras y las mejores prácticas de adaptación, así como el uso de herramientas que pueden ayudar a identificar los impactos del cambio climático, y cómo se pueden tener en cuenta para seleccionar sus posibles respuestas de adaptación.

La Asociación Paraguaya de Carreteras incluirá en su nuevo Manual una guía sobre el Marco de la PIARC, para que los usuarios puedan aplicarlo en el diseño y la conservación de las carreteras en Paraguay.

## 5. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

### 5.1. RECOPIACIÓN DE CASOS DE ESTUDIO

El objetivo del Grupo de Trabajo interno del comité fue recopilar casos de estudios que proporcionaran información sobre la adaptación al cambio climático para la infraestructura carretera. Se recibieron casos de estudios de todo el mundo mediante la realización de una encuesta, con el fin de proporcionar información a los Grupos de Trabajo 1 y 2 para la realización de sus tareas. El Grupo de Trabajo tuvo por objeto reducir los esfuerzos de los Grupos de Trabajo mediante la recopilación y presentación de casos de estudios recopilados en el marco de la encuesta. El hecho de poder acceder a los casos de estudios de manera directa permitió al GT1, por ejemplo, centrarse en la identificación de las prácticas más avanzadas, tanto a nivel de red como de proyecto.

La encuesta se llevó a cabo reconociendo que se espera que el cambio climático y sus impactos sobre el transporte varíen entre las regiones del mundo. Por lo tanto, es muy valioso poder realizar una encuesta a nivel mundial que abarque diferentes entornos regionales, especialmente para examinar las estrategias y las prácticas más avanzadas de adaptación al cambio climático. Esto aseguró la aplicación de una amplia gama de casos de estudio para su uso por el GT1 y el GT2.

### 5.2. METODOLOGÍA DEL GRUPO DE TRABAJO

El enfoque de la encuesta se desarrolló en colaboración con los dos Grupos de Trabajo del CT E.1. Con el propósito principal de apoyar tanto al GT1 como al GT2, el Grupo de Trabajo no tuvo que preparar un plan de trabajo adicional. Para coordinar mejor la realización del estudio, se preparó y actualizó una estructura del resultado esperado y un plan de trabajo interno a medida que avanzaban los trabajos. La encuesta se basó en los siguientes cinco enfoques principales:

- Desarrollo de una matriz para la categorización de casos de estudio.
- Distribución del cuestionario por correo electrónico para solicitar casos de estudio.
- Categorización de los casos de estudios presentados utilizando la matriz.
- Análisis de la matriz completada con el conjunto de casos de estudio categorizados.
- Provisión de los casos de estudios y los resultados del análisis a los Grupos de Trabajo.

Un elemento clave de la matriz es que delinea las prioridades de los programas de trabajo del GT1 y GT2. Además la matriz, que se utilizó para clasificar los casos de estudios proporcionados a los Grupos de Trabajo, se distribuyó también un cuestionario a los miembros del TC E.1 de la PIARC para solicitar casos de estudios. El cuestionario también se envió al Grupo de Expertos sobre los efectos del cambio climático y la adaptación de las redes y nodos de transporte de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE, por sus siglas en inglés) y al Grupo de Trabajo sobre el Cambio Climático de la Conferencia de Directores Europeos de Carreteras (CEDR, por sus siglas en inglés). Este enfoque permitió la recopilación y categorización de casos de estudios pertinentes para una revisión técnica por parte de los Grupos de Trabajo.

### 5.3. RESULTADOS DEL GRUPO DE TRABAJO

En la encuesta se identificaron 59 casos de estudio relevantes de 19 países (Figura 1). La mayoría de los casos de estudios procedían de Europa y América del Norte. Si bien este patrón geográfico podría no representar la disponibilidad total de casos de estudio a nivel mundial, sino que podría estar relacionado con la limitante de que la encuesta se realizó en sólo cuatro idiomas y por los canales específicos utilizados para distribuir el cuestionario. Por lo tanto, los resultados deben ser tratados cuidadosamente, teniendo en cuenta que se basan en un conjunto incompleto de casos de estudio. Además, hay que mencionar que la estructura de la matriz, especialmente la opción de múltiples alternativas en una sección, fue un factor limitante para el análisis y la interpretación estadística. Por lo tanto, el análisis sólo proporcionó una descripción cualitativa de los resultados.

Japón también proporcionó varios documentos, pero como sólo se disponía de resúmenes en inglés, los resultados no se incluyen en el presente informe. Se analizarán en el próximo ciclo de la PIARC en 2020-2023 con los últimos casos de estudios recibidos.

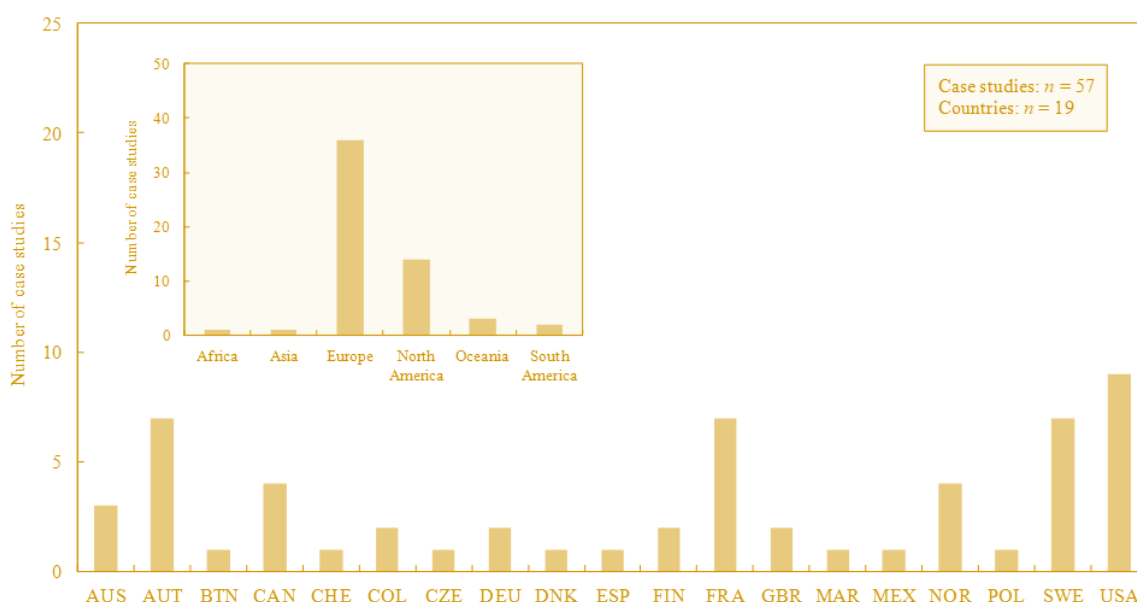


Figura 1: Resumen de los casos de estudio del grupo de trabajo recopilados por país. Fuente: Klose, M, BAST

### 5.4. ENFOQUE PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CASOS DE ESTUDIO

Con el fin de elaborar este informe del GT1, se elaboró una matriz de casos de estudio de última generación para conectar cada etapa del Índice propuesto para este informe con la base de datos de casos de estudio preparada por el Grupo de Trabajo Interno del TC. La matriz también incluía estudios adicionales presentados en talleres y seminarios, así como las presentaciones realizadas por los miembros del Comité Técnico E.1 en todas las reuniones a lo largo del ciclo 2016-2019.

Los casos de estudios identificados se transfirieron luego a este informe, y cualquier vacío en la que se requiriera más información se discutió con los miembros del Grupo de Trabajo 1.

## 6. REQUISITOS DE INFORMACIÓN Y CONTEXTO PARA LA APLICACIÓN DE LAS DIRECTRICES

Tal como se identificó en la Sección 2, el objetivo del GT1 fue llevar a cabo un análisis de casos prácticos sobre el estado actual de las estrategias de adaptación para aumentar la resiliencia de la infraestructura vial a nivel de políticas, estrategias, de sistemas o de proyectos específicos. Esto incluye la consideración de: requerimientos de datos, la vulnerabilidad y la criticidad de la evaluación de la infraestructura carretera, las medidas de adaptación y las metodologías económicas necesarias para analizar el cambio climático.

Estos aspectos están directamente relacionados con los principales etapas del Marco de la PIARC, los cuales incluyen más detalles sobre los enfoques de los casos de estudio para apoyar al Marco. Por lo tanto, los resultados de este informe están estrechamente relacionados con el perfeccionamiento del Marco, tal y como se describe en el informe compilado por el GT2, y además muestra las metodologías de apoyo y las prácticas más avanzadas que pueden apoyar el Marco de la PIARC.

En esta sección del informe se definen los objetivos y el alcance de una evaluación holística del riesgo utilizando ejemplos de enfoques mundiales.

### 6.1. DEFINICIONES

Un paso clave para determinar la adaptación de un proyecto, iniciativa o programa dado, es tener una clara comprensión de lo que se entiende de los términos como riesgo y vulnerabilidad, ya que éstos pueden variar significativamente. En esta sección se presentan las definiciones utilizadas en el presente informe.

La vulnerabilidad se define como "cualquier debilidad que pueda ser explotada por un agresor para hacer que un activo sea susceptible de cambio" (HB167:2006 también FEMA 452 / Enero 2005). Según esta definición, "Vulnerabilidad" y "Riesgo" son cosas diferentes. Una debilidad (vulnerabilidad) en combinación con la exposición a un posible peligro puede llevar a una cierta probabilidad y severidad de sus consecuencias. Por ejemplo, en el Marco de la PIARC, la vulnerabilidad se utiliza para priorizar los activos que se incluirán en la evaluación de riesgos. Aquí se califica la vulnerabilidad y se establece en el cálculo una calificación total del riesgo. Según la PIARC (2015), la vulnerabilidad es el grado en que un sistema es susceptible o incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático. La vulnerabilidad es una función del carácter, magnitud y velocidad del cambio climático y de la variación a la que está expuesto un sistema (exposición); y del grado en que algo se ve afectado, de manera adversa o beneficiosa, por estímulos relacionados con el clima (sensibilidad). Por lo tanto, los activos expuestos y sensibles también se consideran activos vulnerables.

En RAINEX, el enfoque siguiente de la Figura 2, muestra la interrelación entre vulnerabilidad, exposición, amenazas, riesgo y criticidad.



Figura 2: Relación de Amenaza (peligro), criticidad, exposición y vulnerabilidad en rainex.

Fuente: <http://www.rainex-project.eu/>

En el contexto del riesgo, se han obtenido las siguientes definiciones de la Guía ISO 73:

- 3.4.1 Valoración del riesgo: el proceso general de identificación del riesgo (3.5.1), análisis y evaluación del riesgo (3.7.1).
- 3.5.1 Identificación de riesgos - el proceso de encontrar, reconocer y describir riesgos (1.1). La identificación del riesgo implica la identificación de las fuentes del riesgo (3.5, 1.2), los eventos (3.5, 1.3), sus causas y sus consecuencias potenciales (3.5, 1.3). La identificación del riesgo puede incluir datos históricos, análisis teóricos, opiniones informadas y de expertos, y los requerimientos de las partes interesadas (3.2, 1.1).
- 3.6.1 Análisis de riesgos: el proceso para comprender la naturaleza del riesgo (1.1) y determinar el nivel del riesgo (3.6, 1.8). El análisis de riesgos proporciona la base para la evaluación de riesgos (3.7.1) y las decisiones sobre el tratamiento de riesgos (3.8.1). El análisis de riesgos incluye la estimación del riesgo.
- 3.7.1 Evaluación de riesgos: proceso de comparación de los resultados del análisis de riesgos (3.6.1) con los criterios del riesgo (3.3, 1.3) para determinar si el riesgo (1.1) y/o su magnitud son aceptables o tolerables. La evaluación del riesgo ayuda a tomar la decisión sobre el tratamiento del riesgo (3.8.1).

Aunque en el presente informe se hace referencia a estas definiciones, el objetivo es proporcionar metodologías de casos de estudios relativos a las etapas del Marco de la PIARC. Cuando los términos difieren, se proporciona información alternativa.

## 6.2. DEFINIR LOS OBJETIVOS Y EL ALCANCE DE UNA EVALUACIÓN HOLÍSTICA DE RIESGOS

Para iniciar una evaluación de riesgos (donde la "evaluación de riesgos" se define como el proceso holístico tal y como se describe en la Figura 3), una autoridad de carreteras establece sus metas y objetivos y define con precisión el territorio y/o la(s) red(es) a ser estudiada(s). En particular, este paso determina la elección de los recursos humanos y económicos a desplegar, la metodología de evaluación más adecuada, los datos requeridos, el nivel de detalle, etc.

La Figura 2 describe cómo se relacionan la exposición, la vulnerabilidad y la sensibilidad como parte de un<sup>2</sup> proceso holístico de evaluación de riesgos. No obstante, cabe señalar que este proceso también puede identificarse en otras fuentes como un marco general de adaptación, por ejemplo, el Marco de la PIARC. Aquí es donde un marco considerará la identificación del alcance, las variables, el riesgo y los datos necesarios, y luego una evaluación separada de la vulnerabilidad para identificar la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación. Después de este paso, se lleva a cabo una evaluación y priorización de los riesgos para evaluar la probabilidad y la severidad de las consecuencias y la calificación del riesgo, seguida del desarrollo de respuestas de adaptación y la integración de opciones priorizadas en los procesos de toma de decisiones.

El proceso descrito en la Figura 3 demuestra "el proceso general de identificación, análisis y evaluación de riesgos", de acuerdo con la definición de la ISO para la Gestión de Riesgos.

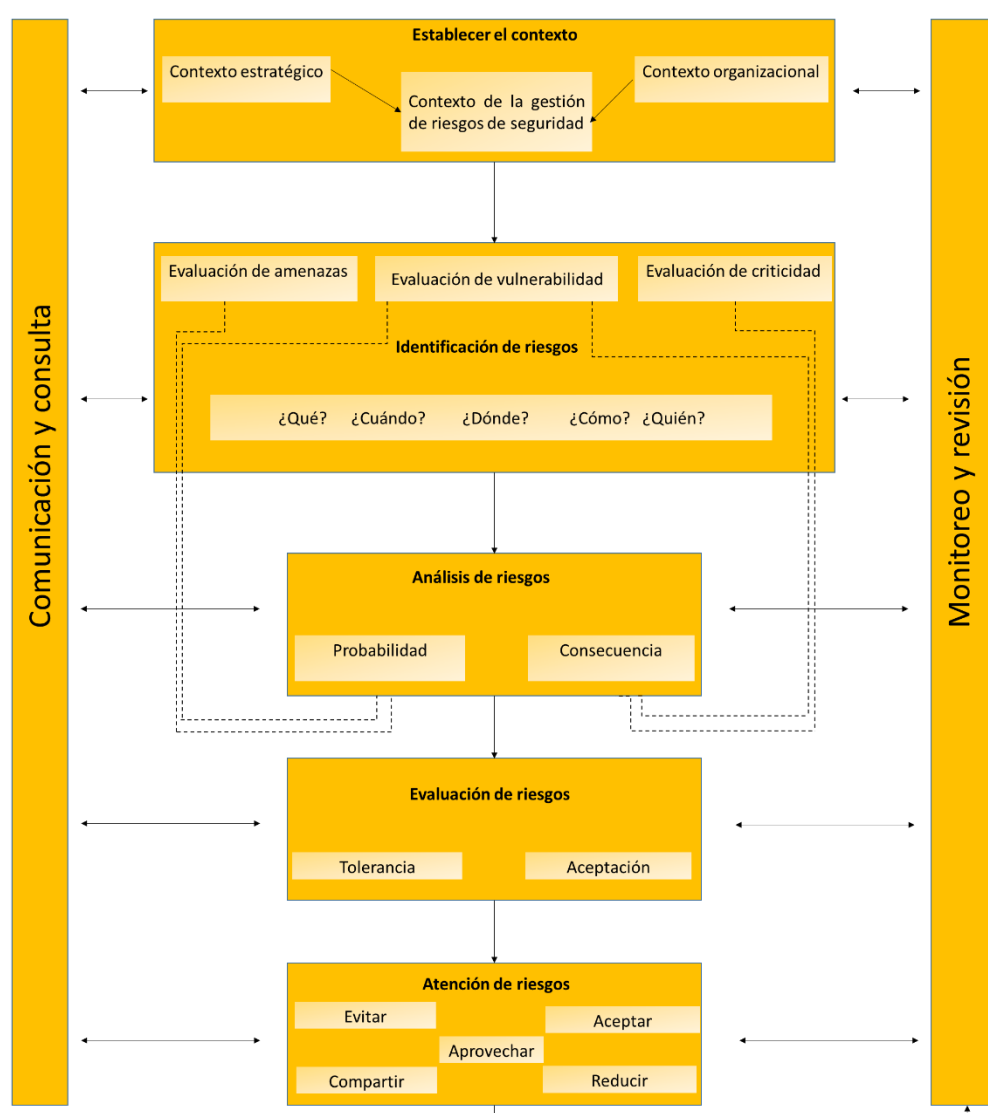


Figura 3: Proceso general de gestión de riesgos. Fuente: HB167:2006 Gestión de riesgos de seguridad; ISO 31000:2009

<sup>2</sup> En este informe se define un proceso holístico de evaluación de riesgos que hace referencia a todos los procesos (evaluación de la sensibilidad, evaluación de la criticidad, evaluación de los riesgos, evaluación de los riesgos y tratamiento de los riesgos).

El objetivo del proceso identificado en la Figura 3 es determinar:

- ¿Cómo se utilizarán los resultados para priorizar las inversiones y modificar, si es necesario, la operación de la red, por ejemplo, para reforzar un activo específico, por ejemplo, un puente?
- ¿Cuál es la disponibilidad de recursos económicos y sociales?
- ¿Qué tipo de datos están disponibles y son necesarios en relación con la infraestructura (estado actual, etc.) y cuáles son las funcionalidades de la red (volumen de tránsito, etc.)?

Esta selección de un proceso apropiado, como se ha señalado anteriormente, se refiere directamente al propósito del estudio que se está llevando a cabo. Por ejemplo, ¿desea la autoridad de transporte dirigir una evaluación general de la vulnerabilidad o incluso una evaluación del riesgo de su red? ¿O la agencia de transporte desea centrarse en una parte de la red/activo que se enfrenta a un peligro específico?

Los casos de estudios identificados en este informe cubrieron un amplio panel de metas, objetivos y alcance de la evaluación de riesgos. Éstas varían desde una evaluación a gran escala, como por ejemplo:

- evaluación de los activos y funciones de las diferentes redes más expuestas a los peligros del cambio climático [5; 6].
- evaluación de las opciones de adaptación más apropiadas de las carreteras frente al cambio climático en cuanto a costos y beneficios [7].

hasta un análisis muy preciso, por ejemplo, :

- evaluación del impacto del hundimiento o erosión en las funciones de la red en un contexto de cambio climático [8].
- análisis de la exposición y vulnerabilidad de los tramos de carretera y de los sistemas de drenaje a las inundaciones en un contexto de cambio climático [9; 10; 11; 12; 13].

Un ejemplo de una metodología de evaluación a gran escala puede encontrarse en el Marco desarrollado del plan nacional francés de adaptación al cambio climático, en la sección de transporte [14].

### **6.3. ASESORAMIENTO PRÁCTICO PARA LLEVAR A CABO UNA EVALUACIÓN HOLÍSTICA DEL RIESGO**

Muchos casos de estudio (por ejemplo,[6; 14]) incluyen, el establecimiento de un grupo de expertos para llevar a cabo una evaluación de riesgos, involucrando:

- especialistas en transporte (por ejemplo, responsables de la operación, el mantenimiento, el desarrollo y el fortalecimiento técnico de las redes) capaces de proporcionar información sobre los activos, sobre las funcionalidades de las redes (por ejemplo, el tránsito) o sobre cuestiones económicas y financieras
- especialistas en clima/meteorología, capaces de proporcionar información sobre los fenómenos meteorológicos del pasado y el cambio climático previsto, o en personas capaces de comprender y utilizar la información climática;
- aquellos que tienen un buen conocimiento en el área de estudio, por ejemplo, sobre amenazas climáticas pasadas o problemas locales, incluso si no están directamente

relacionados con la red (por ejemplo, población aislada debido a la falta de redes carreteras)

- otros especialistas, involucrados en el desarrollo de las necesidades y los objetivos de la evaluación de riesgos, por ejemplo, especialistas en economía, energía, redes de comunicación, planificación territorial y urbana, geología, hidrología, etc., según lo identificado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID)[15].

Es importante que los especialistas interactúen frecuentemente y que las reuniones se planifiquen cuidadosamente para permitir la preparación de una lista de amenazas climáticas, escalas de valoración e indicadores de vulnerabilidad. Por ejemplo, el Centro de Estudios y Experiencia en Riesgos, Medio Ambiente, Movilidad y Desarrollo (CEREMA, por sus siglas en francés de “Centre d’études et d’expertise sur les risques, l’environnement, la mobilité et l’aménagement”) en Francia, ha dirigido una evaluación de riesgos de la red de carreteras “DIR Méditerranée”[6], que es una red de propiedad estatal con más de 750 km de carreteras y numerosas obras de ingeniería. Ha creado un grupo de trabajo compuesto por: el operador de carreteras (DIR Méditerranée, que también se encarga del mantenimiento), el propietario del transporte (el Ministerio francés de Medio Ambiente, que se encarga de las carreteras nacionales), y especialistas en cambio climático, datos y SIG, en infraestructura carretera y en la operación vial.

En los cuadros 1 y 2 se identifican ejemplos adicionales de dónde se comparte y coordina la información.

#### Cuadro 1: Red de intercambio de información confiable del gobierno australiano para infraestructura crítica

La infraestructura crítica proporciona servicios esenciales como alimentos, agua, atención sanitaria, electricidad, comunicaciones, transporte y recursos bancarios. Sin estos servicios, la cohesión social, la prosperidad económica y la seguridad pública de Australia se ven amenazadas. Por lo tanto, la resiliencia de las infraestructuras críticas es esencial para una economía fuerte y un sector empresarial dinámico.

También es vital para la resiliencia de nuestras comunidades ante los desastres.

La Red de intercambio de información confiable (TISN, por sus siglas en inglés) para la resiliencia de infraestructura crítica fue establecida por el Gobierno de Australia en el año 2003. Es el principal mecanismo nacional de participación de Australia para el intercambio de información entre empresas y gobiernos, y las iniciativas de creación de resiliencia de infraestructura crítica. El TISN proporciona un entorno seguro para que los propietarios y operadores de infraestructuras críticas de ocho grupos sectoriales compartan información y cooperen regularmente dentro y entre sectores para abordar los retos de seguridad y continuidad del negocio.

En mayo de 2015, se desarrolló la Estrategia de Resiliencia de Infraestructuras Críticas. La estrategia consiste en una declaración de política y un plan de aplicación práctica, y tiene por objeto garantizar el funcionamiento continuo de las infraestructuras críticas frente a todas las amenazas. Una infraestructura crítica más resiliente también ayudará a apoyar la prestación continua de servicios esenciales (los que proporciona la infraestructura crítica) a las empresas, los gobiernos y la comunidad, así como a otros sectores de infraestructura crítica.

Fuente: Commonwealth de Australia, Critical Infrastructure Resilience Strategy Policy Statement (2015), <https://www.tisn.gov.au/Pages/default.aspx>

#### Cuadro 2: Red de expertos del BMVI, Alemania

El 1 de enero de 2016 se creó la Red de Expertos del Ministerio Federal de Transporte e Infraestructura Digital (BMVI, por sus siglas en alemán) con el fin de aportar soluciones y orientaciones para los retos de transporte de hoy y del futuro. El objetivo de la Red de Expertos del BMVI es situar las competencias existentes sobre una amplia base común, estableciendo una intensa red de contactos entre sí y promoviendo así la transferencia de conocimiento y tecnología entre disciplinas. Este trabajo en red y el intercambio mutuo se centran además en el diálogo entre expertos de los ámbitos de la ciencia y la investigación, la política, la industria y la economía. Los principales temas que se abordan en la investigación colaborativa y la transferencia de conocimientos son los siguientes

- Tema 1: Adaptación del transporte y su infraestructura al cambio climático y a los fenómenos meteorológicos extremos
- Tema 2: Diseño de infraestructura y sistemas de transportes respetuosos con el medio ambiente
- Tema 3: Aumento de la confiabilidad de la infraestructura de transporte
- Tema 4: Desarrollo y utilización coherente de las tecnologías digitales
- Tema 5: Mayor desarrollo de las energías renovables en el transporte y su infraestructura.

Para más información sobre la Red de Expertos del BMVI, véase [www.bmvi-expertennetzwerk.de](http://www.bmvi-expertennetzwerk.de)

Fuente: BAST, Alemania

#### 6.4. VISIÓN GENERAL DE LAS METODOLOGÍAS PARA EVALUAR LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Las siguientes secciones (específicamente las secciones 7 y 8) detallan diferentes enfoques para evaluar la disponibilidad de datos y requisitos, y la exposición. Es relevante considerar primero la disponibilidad de datos generales para cada una de estas evaluaciones, tal como se establece en los objetivos del Plan Estratégico para el GT1. Se pueden utilizar enfoques cualitativos si no se dispone de datos cuantitativos, o como un primer enfoque rápido. Estos enfoques se basan a menudo en el juicio de expertos, y son el resultado de una clasificación cualitativa inicial, por ejemplo, baja/media/alta sensibilidad/exposición/riesgo. A veces, se dispone de información más detallada que podría traducirse en clases de intensidad, ocurrencia, grado de impacto o valoración en una escala relativa. En este caso, puede utilizarse un enfoque semicuantitativo. Los enfoques cuantitativos suelen basarse en modelos que utilizan bases de datos o medidas precisas, lo que puede resultar costoso y llevar mucho tiempo. Además, se observa que las bases de datos o las mediciones pueden no estar siempre disponibles.

Según la PIARC [4], la vulnerabilidad es el grado en que un sistema es susceptible o incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático. La vulnerabilidad es una función del carácter, magnitud y velocidad del cambio climático y de la variación a la que está expuesto un sistema

(exposición); y del grado en que algo se ve afectado, de manera adversa o beneficiosa, por estímulos relacionados con el clima (sensibilidad).

En una evaluación de la vulnerabilidad, es importante considerar una amplia gama de factores para determinar qué aspectos de una red deben priorizarse; por ejemplo, la eficacia, los costos/beneficios (en términos de daños evitados o retrasos evitados), los beneficios colaterales, la flexibilidad de diseño y las barreras de implementación deben ser considerados[56]. Esta etapa debe incluir también la consideración de los objetivos de mantenimiento y las decisiones de puesta en servicio o de clausura de la infraestructura [54].

En el contexto de este informe, la exposición, la sensibilidad, la criticidad y la evaluación de riesgos (tal como se definen en el Marco de la PIARC) se exponen en las Secciones 7, 8 y 9, donde se presentan ejemplos de casos de estudios que ponen de relieve la aplicación de estos métodos.

## 7. EVALUACIÓN DE EXPOSICIÓN

En una evaluación de la vulnerabilidad (o etapa de identificación de riesgos como se establece en la Sección 6.2), es importante considerar una amplia gama de factores para determinar qué aspectos de una red deben considerarse para priorizarse, por ejemplo, la eficacia, los daños evitados o los retrasos evitados, los beneficios colaterales, la flexibilidad del diseño y las barreras de implementación [56]. Este paso debe incluir también la consideración de los objetivos de mantenimiento y las decisiones de puesta en servicio o desmantelamiento de la infraestructura[55]. Por lo tanto, tal como se identifica en el Marco de la PIARC, la vulnerabilidad es una función del carácter, magnitud y velocidad del cambio climático y de la variación a la que está expuesto un sistema (exposición); y del grado en que algo se ve afectado, ya sea de manera adversa o beneficiosa, por estímulos relacionados con el clima (sensibilidad).

Para evaluar las condiciones observadas e identificar las fuentes de riesgo es importante identificar el perfil de la red de interés, por ejemplo, evaluar las condiciones normales de operación en una red intacta, desarrollar un inventario de activos e identificar inicialmente los lugares y componentes críticos. A continuación se realiza la evaluación de la exposición, que se define en la sección 7.1.

### 7.1. DEFINICIÓN DE LA EXPOSICIÓN AL CLIMA

En el Marco de la PIARC, la exposición es la naturaleza de los peligros climáticos a los que una red (y sus componentes) tienen que hacer frente, por ejemplo, la evaluación de las condiciones observadas y la identificación de las fuentes de riesgo. La exposición puede referirse a toda la red, a una parte de la red, a un tramo de carretera y/o a un objeto específico. Por lo tanto, evaluar la exposición de una red de carreteras significa identificar los peligros que pueden ocurrir ahora o en el futuro en un área de la red, y sus características:

- Frecuencia
- Duración
- Intensidad
- Localización

Estas características identificadas dependerán del área de estudio y de los activos de transporte que se evaluarán. Este paso ya debería haberse dado al definir el alcance del estudio.

Según la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, por su siglas en inglés), la exposición<sup>3</sup> se refiere a la situación de las personas, la infraestructura, la vivienda, la capacidad de producción y otros activos humanos tangibles situados en zonas propensas a las amenazas. Esto puede incluir el número de personas o tipos de activos en un área. Estos pueden combinarse con la vulnerabilidad y capacidad específicas de los elementos expuestos a cualquier peligro en particular para estimar los riesgos cuantitativos asociados con ese peligro en el área de interés. Además, RAINEX define la exposición como personas, propiedades, sistemas u otros elementos presentes en zonas de peligro que están sujetos a pérdidas potenciales (por ejemplo, RAINEX sólo se refiere a la infraestructura de transporte terrestre).

---

<sup>3</sup> <https://www.unisdr.org/we/inform/terminology>

## 7.2. SELECCIÓN DE LOS PELIGROS CLIMÁTICOS

Con el fin de evaluar la exposición, los casos de estudio identificados en este documento generalmente proporcionan una lista de los peligros que afectan a las carreteras de acuerdo con las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el clima característico actual de la zona geográfica en la que se encuentra la red o los activos carreteros, por ejemplo, temperatura media, precipitaciones medias, patrones de viento?
- ¿Qué peligros climáticos se han producido ya en esta zona y cuáles han afectado o no a la red: inundaciones, olas de calor, ciclos de congelación y descongelación?
- ¿Qué tipo de peligros suelen afectar a una red de carreteras o a un bien (deteriorándolo antes de lo previsto, destruyéndolo o causando un fallo en la operación del tránsito) incluso si estos peligros no se han producido todavía en esta zona, por ejemplo, un ciclo de congelación-descongelación o una inundación costera? Esto puede hacerse con el uso de análogos climáticos, por ejemplo, la herramienta WATCH (proyecto CEDR, en curso).
- ¿Cómo evolucionarán todas estas amenazas en el futuro?
- ¿Tendrá que hacer frente la red de transporte a nuevos peligros en el futuro, en un contexto de cambio climático, por ejemplo, incendios (el humo puede interrumpir la operación del tránsito)?

En general, los valores medios y extremos en intensidad, frecuencia o duración de los siguientes parámetros y peligros pueden ser útiles para la evaluación del riesgo:

- temperatura: calor extremo/baja temperatura, olas de calor/frío;
- precipitaciones: lluvia, nieve, sequía;
- deslizamientos de tierra: hinchamiento y encogimiento de suelos arcillosos, desprendimientos de rocas, deslizamientos de tierra;
- viento: viento extremo;
- inundaciones: elevación del mar, inundaciones fluviales;
- incendios forestales; y
- otros.

También puede ser importante hacer una distinción entre los parámetros climáticos y los peligros climáticos, causados por los parámetros climáticos. Por ejemplo, los deslizamientos de tierra, las inundaciones y los incendios forestales se consideran amenazas, mientras que los otros parámetros identificados anteriormente son parámetros. Noruega ha emprendido trabajos para definir mejor esta distinción y ha documentado una lista de peligros. Un aspecto clave de las consecuencias es la interrupción del tránsito, como se muestra en el cuadro 1.

| Tipo de interrupción                      | Razones de la interrupción                         |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Puente cerrado</b>                     | Incendio (en la carretera o cerca de la carretera) |
| <b>Túnel cerrado</b>                      | Vehículo en la carretera                           |
| <b>El ferry no está en funcionamiento</b> | Falla en el drenaje                                |
| <b>Carretera cerrada</b>                  | Accidente con sustancias peligrosas                |
|                                           | Inundación                                         |
|                                           | Fallo en la cimentación                            |
|                                           | Restricciones altura - longitud - anchura - peso   |
|                                           | Desprendimiento de tierras                         |
|                                           | Rápido deslizamiento de arcilla                    |
|                                           | Caída de rocas                                     |
|                                           | Avalancha                                          |
|                                           | Marejada de tormenta                               |
|                                           | Falla eléctrica                                    |
|                                           | Sitio/Tramo de accidente                           |
|                                           | Viento                                             |
|                                           | Clima adverso                                      |

*Tabla 1: Resumen de los tipos y razones de la interrupción*

En el Cuadro 3 se presenta otro caso de estudio que muestra la identificación y definición de los peligros.

### Cuadro 3: Estudio de inundaciones en “Bruce Highway”

El Estudio de Inundaciones de la Autopista “Bruce” es un proyecto iniciado y administrado por el Departamento de Transporte y Carreteras Principales (TMR, por sus siglas en inglés) de Queensland. El estudio hace uso de una técnica hidrológica conocida como simulación continua que se está utilizando de una manera completamente nueva para evaluar la confiabilidad a largo plazo de las inundaciones en el tramo de la autopista Bruce Highway desde Brisbane hasta Cairns. El estudio examina el comportamiento de las inundaciones de toda la carretera durante los últimos cien años, utilizando los registros de precipitaciones para generar caudales de arroyos en cada cruce (hay más de 500 de ellos); estos datos se combinan con la evaluación hidráulica para determinar cuándo se interrumpe cada cruce a causa de las inundaciones. Este procedimiento simula efectivamente el desempeño a largo plazo de cada tramo de la autopista durante los últimos cien años. Una vez establecido esto, el estudio examina la mejora de los segmentos clave de la autopista y la re-simulación del rendimiento para cuantificar el nivel de mejora de la confiabilidad. El nivel de mejora alcanzado puede cuantificarse en términos económicos (es decir, reducción de las perturbaciones), lo que constituye la base de un programa coherente y transparente de priorización de las obras de mejora. Esta es la primera vez que se realiza una evaluación holística de toda la autopista “Bruce Highway” y es el mayor estudio de inundación jamás realizado en Queensland. Esto también es relevante para la Sección 9 en la evaluación de las implicaciones económicas de los eventos de cambio climático.

Fuente: Departamento de Transporte y Carreteras Principales, Queensland

## 7.3. SELECCIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Cabe señalar que para comprender cómo se verá afectada la futura infraestructura carretera por el cambio climático, es necesario elaborar o investigar las proyecciones pertinentes sobre los escenarios del cambio climático. Hay cuatro formas principales de elaborar proyecciones sobre el cambio climático:

- Comparación de eventos históricos con las necesidades de mantenimiento y reparación. Es posible estimar qué tan bien pueden soportar los activos los factores climáticos estresantes en el futuro. Esto da lugar a la selección de enfoques adaptativos para que la estructura sea menos vulnerable. Sin embargo, esto también debe balancearse frente a la incertidumbre de los acontecimientos futuros y si un activo/red está expuesto a factores estresantes a los que actualmente no está expuesto[49].
- Ubicación geográfica para determinar los factores del cambio climático principales - la ubicación geográfica de un área para la evaluación juega un papel fundamental al determinar qué variables climáticas deben ser consideradas como riesgos.
- Datos de proyecciones de cambio climático existentes y evidencia para determinar las condiciones futuras. Los datos sobre el cambio climático, los escenarios y las escalas de tiempo asociadas a ellos son consideraciones importantes a la hora de determinar qué variable climática y qué impactos incluir en una evaluación. Para que la estrategia de evaluación de la adaptación al cambio climático para la infraestructura carretera sea eficaz, es esencial que los datos utilizados procedan de una fuente confiable y sólida, ya que

constituirá la base de cualquier proceso de evaluación de riesgos que se lleve a cabo en el futuro.

- Elaborar escenarios y proyecciones de cambio climático es importante, ya que la información aún no existe en muchos países. Cabe señalar que muchos factores de vulnerabilidad pueden ser mapeados utilizando los conjuntos de datos de SIG existentes. Por ejemplo, el CEDR identifica un método para la recolección de datos en las directrices del proyecto ROADAPT. Este método utiliza conjuntos de datos SIG creados a partir del conocimiento local, inventarios de campo y estudios cartográficos. Este método consiste en dos subetapas principales, inventario y recopilación de datos del SIG, y completar los conjuntos de datos del SIG que faltan[4].

Una vez que se han seleccionado los peligros, se sugiere que se lleve a cabo un ejercicio de proyección climática. También es necesario comprobar qué datos están disponibles para caracterizar estos peligros. Si se dispone de información, el primer paso sería un ejercicio de proyección climática, antes de realizar una evaluación de la exposición. El conocimiento sobre el cambio climático se puede desarrollar haciendo referencia al Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (PICC)[16]. Sin embargo, los datos climáticos deben especificarse de forma exhaustiva para permitir la evaluación de los impactos potenciales a nivel de red u objeto. En general, los casos de estudio resumen las tendencias del cambio climático a nivel nacional, antes de caracterizar la frecuencia, duración y/o intensidad de los eventos pasados y futuros a nivel regional o más preciso.

Las proyecciones climáticas se basan en los resultados de modelos matemáticos (Modelos de Circulación General - MCG) que describen las interacciones entre la tierra, la atmósfera, el océano, etc., y las aportaciones de los modelos, como los escenarios socioeconómicos relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, las proyecciones climáticas dependen del modelo y del escenario de las condiciones socioeconómicas y de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos escenarios climáticos se denominan "Trayectorias de Concentración Representativas" (RCP's, por sus siglas en inglés). Por este motivo, al dirigir una evaluación de la exposición, la agencia de transporte tendrá que elegir qué modelo climático y qué escenario de condiciones socioeconómicas y emisiones de gases de efecto invernadero se utilizarán.

El PICC ha comparado un gran número de modelos climáticos y algunos de ellos proporcionan proyecciones a escala nacional que pueden utilizarse para la evaluación. Con el fin de reducir las incertidumbres inherentes a la modelización climática, algunos casos de estudio utilizan meta-modelos, conjuntos de modelos o comparaciones entre los resultados de diferentes modelos. La reducción de escala es una técnica en la que los datos en los MCG pueden utilizarse para producir escenarios con una mayor resolución para una región determinada, que también se utilizan habitualmente. Durante la última década, la resolución de los datos climáticos ha aumentado significativamente y los científicos del clima están trabajando para aumentar aún más la resolución. La calidad de los datos climáticos disponibles variará según el país. El Marco de la PIARC proporciona más detalles sobre el uso de proyecciones de datos a escala reducida. Por ejemplo, el proyecto de la Base de Datos de Proyecciones Climáticas para Carreteras del CEDR (ClipDaR) es un buen ejemplo de directrices cuyo objetivo es ayudar a los usuarios a decidir qué métodos y escenarios aplicar para pronosticar el cambio climático futuro y los impactos en el mantenimiento de carreteras utilizando enfoques conjuntos y métodos de reducción de escala.

Si no se dispone de modelos específicos para el área de estudio, podría ser posible utilizar datos de estudios locales o pedir a los expertos que definan la posible evolución de los peligros climáticos. Esto puede afectar especialmente a peligros como los deslizamientos de tierra, el nivel del mar a escala local, las inundaciones, etc. Por ejemplo, en Quebec (Canadá), el Ministerio de Transporte modeló el riesgo de derretimiento del permafrost utilizando datos sobre las características del permafrost de diferentes regiones, patrones de drenaje y nevadas[17; 18; 19].

La elección del modelo influye en la elección del escenario climático por razones de disponibilidad de datos. En general, los casos de estudio comparan diferentes escenarios[6; 20]. Un enfoque pesimista, por ejemplo, RCP8.5, representa un posible clima futuro si no se modifica el aumento de la tasa de emisiones de gases de efecto invernadero. Alternativamente, un enfoque optimista, por ejemplo, RCP2.6, corresponde a la implementación de una política de mitigación fuerte, y un enfoque intermedio, por ejemplo, RCP4.5, que está relativamente cerca de un futuro posible si se implementan unas cuantas medidas de mitigación. Cuando estos escenarios no están disponibles, también se pueden utilizar otros.

#### Cuadro 4: CORDEX

CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment), que en español significa “Experimento coordinado de reducción climática regional” es una iniciativa internacional para evaluar el rendimiento de los modelos climáticos y producir proyecciones climáticas de alta resolución para su uso en estudios de impacto y adaptación para todo el mundo. Está patrocinado por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC) y funciona desde 2009. El objetivo de CORDEX es ayudar a reducir la brecha entre los científicos del clima y los usuarios de los datos de las proyecciones. Se están llevando a cabo simulaciones de modelos múltiples ejecutados con cuatro RCP's (RCP2.9, RCP4.5, RCP8.5 y RCP11.2) para cinco dominios (África, Australasia, Sudamérica, Norteamérica y Europa hasta 2100).

CORDEX está desarrollando actualmente el informe (2018) y este proceso aún no ha concluido. Actualmente no existe un archivo central, pero se pueden descargar algunos datos de los portales regionales. Las simulaciones Euro-CORDEX producirán datos a una resolución de 12 km.

Fuente: Sitio web de CORDEX y EURO-CORDEX - <http://www.cordex.org/about/> y <https://www.euro-cordex.net/index.php/en>

Por último, la agencia de transporte debe elegir el período para el que se extraerán los datos climáticos de los modelos. Las ciencias del clima suelen utilizar un período de treinta años para proporcionar análisis estadísticos confiables; por lo tanto, es preferible utilizar al menos un período igual de análisis. La mayoría de los casos de estudio comparan un período de referencia (un período pasado de 30 años, a menudo 1961-1990), con diferentes futuros. Esto proporciona una buena base de comunicación con las autoridades de transporte al mismo tiempo que proporciona valores de las variables climáticas, y muestra cuánto podría evolucionar el cambio climático. Teniendo en cuenta que una carretera está compuesta de activos diseñados para distintas duraciones de vida (por ejemplo, un pavimento carretero comparado con un puente), puede resultar difícil proyectar las incertidumbres a largo plazo. Por lo tanto, puede ser relevante extraer proyecciones de los peligros climáticos para un período de corto plazo, por ejemplo, los próximos 30 años. Como muchos activos se construyen para durar mucho mas tiempo, y para poder anticiparse mejor a las tendencias climáticas, también es importante extraer un período a largo plazo, por ejemplo, 2071-2100. Sin embargo, se observa que algunas proyecciones pueden no estar disponibles para estos períodos, lo que puede hacer que la comparación sea más difícil y con mayor incertidumbre.

#### Cuadro 5: Herramientas nacionales francesas para compartir datos sobre el cambio climático

Para evaluar la evolución de los riesgos en el área de estudio de “DIR Méditerranée”, el grupo de trabajo ha creado una serie de herramientas gratuitas en línea, entre las que se encuentran las más importantes:

- Climat HD (<<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>>): Ofrece información simplificada a escala de Francia sobre los cambios climáticos y de las regiones francesas. Esto es interesante para iniciar discusiones con las autoridades de transporte sin empezar a desarrollar mapas que muestren la evolución de cada peligro climático seleccionado.
- DRIAS (<<http://www.drias-climat.fr/>>): Portal web que permite acceder a las proyecciones climáticas de los valores medios y extremos en intensidad, frecuencia y duración de las lluvias, temperaturas, sequías, incendios forestales, etc., para diferentes escenarios: RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 a escala francesa con una precisión de 8 km<sup>2</sup>. Los datos climáticos provienen de modelos evaluados por el PICC (Arpège Climat, WRF, Eurocordex).

Fuente: CEREMA. Análisis de riesgos DIR Mediterráneo, 2017. [6]

#### Cuadro 6: El ejemplo austriaco de adaptación al cambio climático

En Austria, las evaluaciones regionales de los modelos climáticos globales (MCG) pueden ser útiles para áreas más extensas como, por ejemplo, el espacio alpino. Hay 15 resultados diferentes de la última generación de MCG disponibles. Al considerar este conjunto de resultados del modelo, se pueden hacer declaraciones sobre la seguridad de los resultados, además de la tendencia promedio. Para poder derivar los efectos del cambio climático en las subregiones de la región alpina, los llamados "enfoques para su implementación" (consideración de las condiciones regionales en una resolución espacial de 10 x 10 km) deberían ser seguidos por los modelos climáticos globales. Sin embargo, los cambios regionales son mucho más difíciles de simular que los cambios en los promedios mundiales, por lo que las declaraciones, con respecto a regiones individuales, están sujetas a mayores incertidumbres.

Fuente: Programa de investigación adapt2to4, Universidad de Graz, 2014. [21]

## 7.4. VALORACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

Una vez identificados los valores que caracterizan los peligros, es posible evaluar la exposición. También es importante analizar la exposición cualitativamente (marco de la PIARC), semicuantitativamente (por ejemplo, RIVA (véase la sección 9)) y sobre una base totalmente cuantitativa (por ejemplo, Infrarisk) (véase la sección 9). Un método para hacer esto es definir una escala de puntuación que refleje la evolución de cada amenaza climática. Esto permitirá a la agencia de transporte comprender qué peligros están actualmente expuestos en su red y cómo puede evolucionar la exposición.

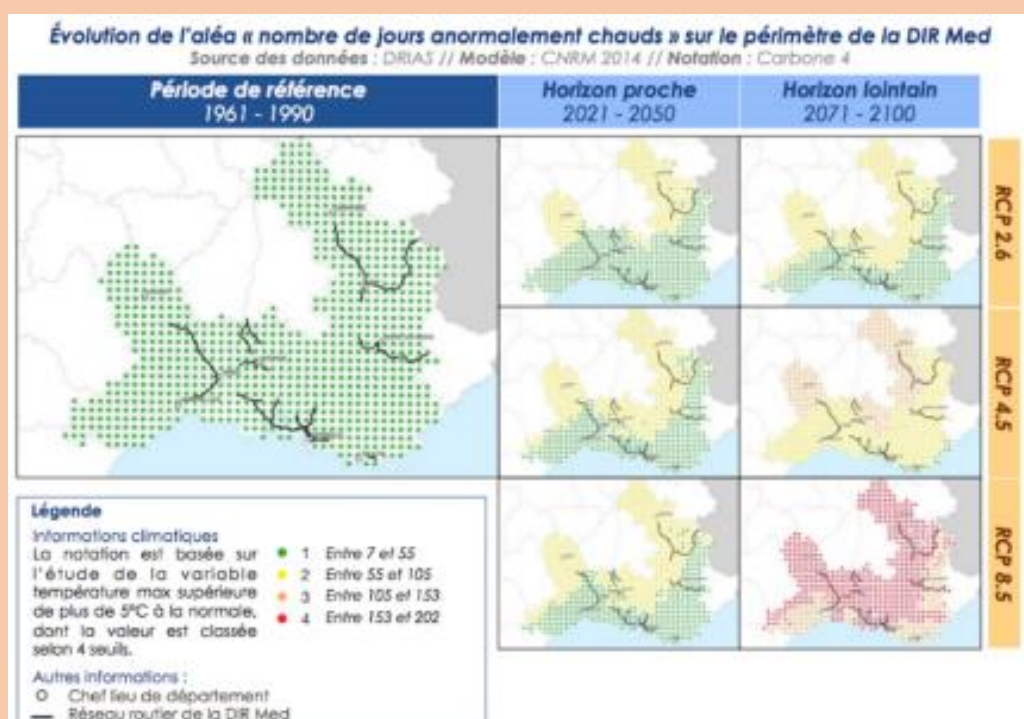
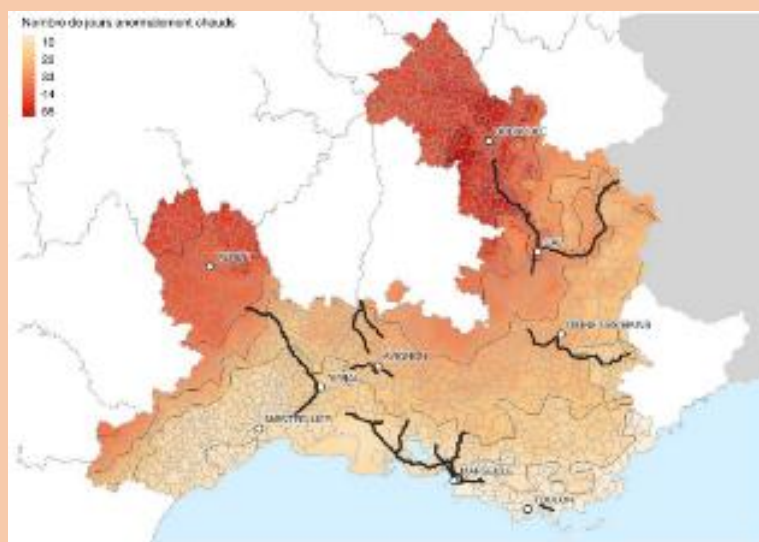
Esta escala de puntuación puede utilizarse inicialmente para la valoración global de la vulnerabilidad, ya que permite un examen detallado de las amenazas y su evolución en el contexto del cambio climático, sin tener en cuenta el alcance de los posibles daños o perturbaciones de la red (como lo haría una evaluación completa del riesgo). Una evaluación de la vulnerabilidad suele

combinarse con una evaluación de la criticidad para identificar los activos que son a la vez críticos y altamente vulnerables a una amenaza climática.

La utilización de la misma escala de puntuación para las diferentes evaluaciones permitirá comparar los resultados de cada una de ellas. Un ejemplo de puntuación de la exposición se identifica en el Cuadro 7 proporcionado por CEREMA (Francia).

# Cuadro 7: De la caracterización de la exposición a la evaluación de la exposición

Un ejemplo de valoración de la exposición lo proporciona el responsable de la evaluación de riesgos de la red (Ejemplo de caso: DIR Méditerranée). El primer mapa muestra una extracción de datos climáticos para un período de referencia de treinta años, y el segundo mapa muestra la escala de valoración de estos datos para tres períodos diferentes: el período de referencia, escenario 2021-2050 y el escenario 2071-2100.



Fuente: CEREMA. Análisis de riesgos DIR Mediterráneo, 2017. [6]

## 8. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS NECESARIOS PARA EVALUAR LA SENSIBILIDAD, LA VULNERABILIDAD GENERAL Y LA CRITICIDAD

En esta sección se esbozan los enfoques de los casos de estudio para apoyar la etapa de evaluación de la vulnerabilidad de el Marco de la PIARC y la criticidad de la infraestructura carretera, en las cuales se incluyen enfoques de vanguardia que se están llevando a cabo en todo el mundo:

- Evaluar la vulnerabilidad, como la identificación de la necesidad. la disponibilidad y accesibilidad de datos; y la puntuación de la sensibilidad.
- Evaluar la criticidad, como la definición, la elección de la metodología de evaluación y la valoración de la criticidad. La evaluación de la “criticidad” no está incluida en el Marco de la PIARC, aunque muchos casos de estudio hacen referencia a este enfoque. El GT2 ha abordado esta cuestión en su informe, como un nuevo concepto que debe incluirse en las evaluaciones de riesgos, por lo que, a fin de complementar el informe del GT2, se ha incluido la criticidad como un elemento necesario en el proceso de adaptación.
- Identificar las razones por las que se aplica una evaluación holística de riesgos utilizando ejemplos de arriba hacia abajo (top-down) de vanguardia, con enfoques de análisis de riesgos cuantitativos, basados en indicadores, y de análisis de riesgos probabilísticos.

Esta sección se centra en los métodos para evaluar la sensibilidad, la vulnerabilidad de forma integral y la criticidad.

### 8.1. EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD

#### 8.1.1. Definición de la sensibilidad de la infraestructura

Como se indicó en la Sección 6.4, la vulnerabilidad incluye la consideración de la exposición y la sensibilidad. Según el PICC[1], la vulnerabilidad es el grado en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad y los extremos del clima. La vulnerabilidad es una función del carácter, magnitud y velocidad del cambio climático y de la variación a la que está expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación. En el Marco de la PIARC, la sensibilidad se define como el grado en que un sistema se ve afectado, ya sea de manera adversa o beneficiosa, por los estímulos relacionados con el clima. Esto significa que una categoría de activos carreteros es más o menos sensible a cada tipo de riesgo climático. La sensibilidad se evalúa por categoría de activos y por categoría de riesgo climático. Por ejemplo, los sistemas de drenaje son en general sensibles a los patrones de precipitación, pero son relativamente poco sensibles a las condiciones del viento.

La sensibilidad de dos activos del mismo tipo puede variar según su estado, su material de construcción, su nivel de mantenimiento, etc. Es por ello que los casos de estudio incluyen generalmente la noción de factores agravantes y de su capacidad adaptativa[6; 14]. Los sistemas de drenaje son generalmente sensibles a los patrones de precipitación, y un sistema de drenaje con un mantenimiento deficiente puede ser más sensible, aquí, el mantenimiento es un factor agravante.

Al evaluar la vulnerabilidad, primero se determina de manera general la sensibilidad de cada categoría de activos frente a cada tipo de amenaza climática, y luego, de manera más precisa, se introducen los factores agravantes y de su capacidad adaptativa. Un método para evaluar la

vulnerabilidad consiste en identificar los factores relacionados con la sensibilidad y la exposición (véase la Sección 8) y calificarlos, basándose en los datos o en el juicio de los expertos. De acuerdo con el Marco de la PIARC, mediante la combinación de las calificaciones de exposición y sensibilidad, es posible identificar si un activo es vulnerable, en qué grado y mediante qué variables climáticas se ven afectados los activos viales. Por lo tanto, una combinación de sensibilidad y exposición proporciona una valoración global de la vulnerabilidad.

### 8.1.2. Enfoques para la recopilación de datos

Un gran número de los casos de estudio identificados por el grupo de trabajo interno del CT E.1 tratan de la sensibilidad como parte de una evaluación de la vulnerabilidad. Muchos casos de estudio comienzan con una descripción de los impactos generales debidos a los peligros climáticos actuales y futuros potenciales en diferentes tipos de activos carreteros o en activos específicos. Utilizando esta información, es por lo tanto posible realizar una revisión de la literatura para un proyecto propuesto. Los casos de estudio proporcionan una buena base para informar la revisión de la literatura[22; 23; 24; 25...].

También es posible evaluar cualitativamente la sensibilidad de una red mediante una reunión de lluvia de ideas con las autoridades de transporte, pidiéndoles, por ejemplo, que enumeren en un mapa de su red los principales impactos climáticos ocurridos en los últimos años (FHWA 2017), o mediante una visita de campo con expertos para identificar los activos más sensibles (ver el caso de estudio de México en el informe del GT2).

Los datos cualitativos recopilados pueden proporcionar algunas ideas clave para profundizar más en la evaluación de la sensibilidad y definir indicadores para evaluar la sensibilidad semicuantitativos, incluidos los factores agravantes o de su capacidad adaptativa. Sin embargo, este enfoque sólo debe utilizarse en ausencia de datos. Los indicadores semicuantitativos se utilizan con mayor frecuencia para evaluar la sensibilidad de las diferentes categorías de activos o de activos específicos ante los riesgos climáticos. Pueden utilizarse para identificar, por ejemplo, qué sección de la carretera es la más sensible a las altas temperaturas, dependiendo del tipo de asfalto, el volumen de tránsito, etc., o a qué velocidad del viento un activo específico o equipamiento, es sensible. Además, es importante tener en cuenta que en algunos países los sistemas avanzados de recopilación de datos y la información pueden no estar disponibles (por ejemplo, capas de información en SIG); por lo tanto, la colaboración con los representantes locales es muy importante para obtener los datos necesarios.

Por lo tanto, un primer paso necesario es dividir la red en categorías de activos, como la superficie de la carretera, la estructura de la carretera, los puentes, taludes de corte y terraplén, los sistemas de drenaje y el equipamiento.

Una vez que esto se ha llevado a cabo, se pueden disponer de enfoques alternativos de recopilación de datos para definir los indicadores. Se realiza una revisión bibliográfica de los daños pasados, incluyendo detalles del peligro que se presentó en las carreteras [23], así como una recopilación de juicios de expertos (entrevista, cuestionario, visita, etc.) para definir los factores agravantes o de capacidad adaptativa.

#### Cuadro 8: Evaluación de los impactos de los escurrimientos superficiales en los sistemas de drenaje en Suecia

Las inundaciones son un problema para Suecia, lo cual ha llevado a numerosos estudios para comprender mejor los posibles impactos de este peligro en las carreteras y en los activos para el drenaje en las carreteras. Por ejemplo, en el sur de Suecia se ha llevado a cabo una evaluación de la evolución del impacto de los escurrimientos superficiales en los activos del sistema de drenaje en las carreteras. El estudio se basa en un modelo capaz de tener en cuenta el agua de escorrentía en una cuenca específica, los indicadores relacionados con la cubierta vegetal que influye en la escorrentía del agua y el sistema de drenaje. Los escenarios de cambio climático, que describen la evolución del patrón de precipitaciones y la temperatura, y los escenarios de cambio de uso del suelo (cambio en la cubierta vegetal) se basan en estudios científicos (no en escenarios RCP's).

Fuente: Michaelsen, A. Modelling flood risk of transport infrastructure based on watershed characteristics. [11]

#### 8.1.3. Valoración de la sensibilidad

En la evaluación general de los casos de estudio se identificó que es necesario establecer una escala de sensibilidad y luego evaluar la sensibilidad de acuerdo con indicadores semicuantitativos o con los resultados de los modelos. Además, la valoración de la sensibilidad de cada activo es una variación de la puntuación global de la sensibilidad de la categoría de activos por riesgo con los factores agravantes o de su capacidad de adaptación. Esta calificación se ha combinado con la exposición actual y futura para evaluar la evolución de la vulnerabilidad, y luego se ha llevado a cabo una evaluación de la criticidad (véase el Cuadro 9).

Las escalas desarrolladas en los casos de estudio a menudo responden a las necesidades prácticas de las autoridades de transporte, por lo que a menudo se basan en el nivel de degradación de las carreteras. Es importante establecer una escala única para todas las evaluaciones de vulnerabilidad que deben compararse.

Este enfoque es uno de los principales resultados de la metodología definida en el marco del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Francia (PNACC, por sus siglas en francés) [14]. En el Cuadro 9 se destaca uno de los estudios que utiliza esta metodología.

**Cuadro 9: Evaluación de la vulnerabilidad de una gran red de carreteras: DIR Méditerranée (Francia)**

El caso de estudio "DIR Méditerranée" se centra en una red de carreteras estatales de 700 km de longitud en el sureste de Francia.

Para valorar la sensibilidad de cada activo de la red, el grupo de trabajo encargado del caso de estudio desagrega primero las redes en categorías generales, como por ejemplo para carreteras:

- pavimento;
- obras de ingeniería;
- pequeños sistemas de drenaje;
- equipamiento; y
- otros activos.

A continuación, se ha vuelto a desglosar la categoría de activos "pavimento":

- tipo de superficie;
- estructura del pavimento;

y la clase de activos fijos "obras de ingeniería" en:

- puentes;
- muros de contención.

Este mismo enfoque se aplica a los demás activos enumerados anteriormente. Las principales sensibilidades de cada categoría de activos se han evaluado mediante una revisión bibliográfica, y mediante intercambios con las autoridades de transporte que han ayudado al grupo de trabajo a definir indicadores generales de sensibilidad y a desarrollar una escala para la valoración. Así pues, se ha calificado la sensibilidad global en cada categoría de activos. El grupo de trabajo llevó adicionalmente intercambios más detallados con expertos y con la agencia de transporte para definir los factores agravantes y de capacidad de adaptación para diferenciar la sensibilidad de los diversos activos de la misma categoría. Estos incluyen el volumen de tránsito (con un tránsito con vehículos pesados, la carretera puede sufrir daños acelerados durante las olas de calor), la porosidad de la carretera (cuanto más porosa es, más puede ser dañada por las fuertes lluvias), etc.

Para valorar la sensibilidad de forma mas exacta, se ha utilizado una base de datos nacional (denominada "Isidor"). Esta base de datos proporciona información sobre las carreteras de propiedad estatal, sobre el volumen de tránsito, los materiales utilizados para construir puentes, describe las grietas de las carreteras, etc. La valoración de la sensibilidad de cada activo es una variación de la puntuación global de la sensibilidad en cada categoría de activos, por tipo riesgo, y con los factores agravantes o de capacidad de adaptación. Este puntaje se ha combinado con la exposición actual y futura para evaluar el nivel de vulnerabilidad, y luego se ha realizado una evaluación de criticidad.

Fuente: CEREMA. Análisis de riesgos DIR Mediterráneo, 2017. [6]

#### Cuadro 10: Visión general del proyecto “EWENT” en Finlandia

Uno de los resultados publicados en el marco del proyecto de investigación EWENT (Extreme Weather impacts on European Networks of Transport), que en español significa “Impactos climáticos extremos en las redes europeas de transporte”, se ha centrado en los impactos de las amenazas en diferentes tipos de modos de transporte, incluidas las carreteras. Este proyecto de investigación se basa en una amplia revisión de la literatura, que incluye más de 150 artículos o estudios científicos, y una revisión de los medios de comunicación sobre 190 amenazas que se han producido en diferentes países europeos. Así, el estudio de investigación ha identificado diferentes impactos potenciales de los peligros climáticos en los activos y en la operación de las redes de carreteras y ha propuesto una clasificación del nivel de los impactos en función de los diferentes niveles de los peligros, a escala europea.

Fuente: Leviakangas, P., Tuominen, A., Molarius, R., Kojo, H. Extreme weather impacts on transport systems, 2011. [23]

#### 8.1.4. Evaluación de la vulnerabilidad integral

La vulnerabilidad general de un activo o de una sección de la red carretera se define en el Marco de la PIARC como el grado en que un sistema es susceptible o incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los extremos. En términos más técnicos, la vulnerabilidad es una combinación de sensibilidad y exposición, y es una función del carácter, magnitud y velocidad del cambio climático y la variación a la que está expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación.

En la mayoría de los casos, los casos de estudio combinan la sensibilidad con la exposición actual o futura utilizando una escala basada en las escalas de exposición y sensibilidad. Es útil diseñar la escala con la autoridad de transporte para definir el nivel de las escalas adaptadas según las cuestiones prácticas de la autoridad vial.

Si se van a realizar evaluaciones de riesgos para diferentes redes, es importante prever que la comparación entre las evaluaciones sólo será posible si la escala de vulnerabilidad es la misma para cada estudio.

**Cuadro 11: Mejoramiento de la carretera de acceso a Pasakha - Proyecto de conectividad vial de SASEC**

El área del proyecto de la carretera de acceso a Pasakha se encuentra en el fondo de una región muy escarpada en el suroeste de Bhután, compuesta en parte por una formación de suelo no consolidada. La interacción entre el suelo y el agua, completada por pendientes abruptas, provoca frecuentes deslizamientos que pueden dañar gravemente la infraestructura carretera y, las tierras agrícolas y forestales.

En pendientes pronunciadas, se puede producir una alta velocidad en la corriente induciendo la erosión de piedras y rocas. Las inundaciones repentinas en estas laderas de los valles altamente erosionables arrastran tierra, lodo y escombros sólidos a través de los ríos y socavan la infraestructura. Un diseño carretero inadecuado puede resultar en serios daños a la carretera y al medio ambiente debido a la alta concentración de escorrentía y a la baja calidad de los suelos en esta región. El impacto ambiental debe ser monitoreado en cada paso del diseño y durante la construcción.

Debido al cambio climático, se prevé que la temperatura anual del aire de Bhután aumentará en 1°C en los próximos 25 años y en 2°C en 55 años, con una mayor frecuencia de olas de calor en verano y una mayor variación de la temperatura estacional. Esta evolución climática puede llevar a la formación de surcos, grietas y a la segregación de los pavimentos, creando o acelerando el daño de la carretera. Además, la variación de la temperatura afectará la expansión térmica y la contracción de las estructuras de los puentes. En los puentes pueden producirse daños prematuros en los extremos de las losas de la cubierta y peligros en la carretera.

En el suroeste de Bhután, se espera que las precipitaciones aumenten tanto en intensidad como en duración, entre un 10 y un 18% entre 1999 y 2050 (según el informe de la Comisión Nacional del Medio Ambiente sobre el Cambio Climático). Además, la disparidad de las frecuencias de lluvia entre las diferentes estaciones aumentará, con más lluvias en el período más húmedo y en invierno será aún más seco. Las lluvias extrema, junto con el sistema de drenaje obstruido, socavarán y debilitarán las superficies del pavimento, lo que resultará en grietas y en la posible pérdida de la carpeta asfáltica.

El aumento de la intensidad, la duración y la frecuencia de las precipitaciones dará lugar a mayores niveles del flujo máximo y a mayores riesgos de inundaciones y deslizamientos de tierras. Esto impactará directamente en la velocidad de la corriente en las ubicaciones de los puentes y luego en la capacidad de descarga de las escorrentías o en inundaciones del sistema de drenaje y, en la ampliación de las obras de protección contra inundaciones y socavaciones. Las infraestructuras, tales como puentes y obras de drenaje pueden sufrir graves daños debido a estas inundaciones y al arrastre de escombros sólidos.

Fuente: EGIS, Improvement of Pasakha Access Road - SASEC Road Connectivity Project - Bhután, 2016. [26]

## 8.2. EVALUACIÓN DE LA CRITICIDAD

La criticidad se define en la “guía para todos los peligros en la infraestructura de transporte” (All-Hazard Guide for Transport Infrastructure, 2015, véase[27]) como la relevancia de un elemento o sección de la infraestructura en la disponibilidad de un sistema de infraestructura carretera. Además, en el Proyecto 20-05 (Tema de Síntesis 48-13 )del Programa Cooperativo Nacional de Investigación de Carreteras (National Cooperative Highway Research Program - NCHRP), define un activo crítico: *Resiliencia en la planificación, ingeniería, gestión, política y administración del transporte*, como activos que, de perderse o dañarse, degradarían gravemente o limitarían la capacidad de un propietario para desempeñar funciones básicas o su misión.

Según la norma australina HB 167 “Gestión de riesgos de seguridad”, afirma que la evaluación de la criticidad (en algunas fuentes conocidas como la “evaluación de activos”), implica la identificación de los activos críticos (personas, propiedades, información y los procesos que los soportan) que pueden estar expuestos a, o dañados por, la amenaza. La evaluación de la criticidad es un paso vital en la identificación del riesgo, ya que proporciona el punto de partida para la consideración de las amenazas pertinentes, y la vulnerabilidad de la organización, la comunidad o el individuo a esas amenazas. En muchas circunstancias es difícil y costoso llevar a cabo una evaluación completa de los riesgos para todos los activos, lugares y personas. La evaluación de la criticidad permite que el análisis se centre en aquellos activos que son de mayor importancia para la organización, la comunidad o el individuo. La elección de los activos a evaluar estará guiada en gran medida por el contexto desarrollado para la actividad de gestión de riesgos.

La infraestructura crítica también se define en Australia [57] como “aquellas instalaciones físicas, cadenas de suministro, tecnologías de la información y redes de comunicación que, de ser destruidas, degradadas o dejadas fuera de servicio durante un período prolongado, tendrían un impacto significativo en el bienestar social o económico de la nación o afectarían la capacidad de Australia para llevar a cabo la defensa nacional y garantizar la seguridad nacional”.

En este contexto, “significativamente” representa un evento o incidente que pone en riesgo la seguridad y confianza pública, amenaza nuestra seguridad económica, daña la competitividad internacional de Australia o impide la continuidad del gobierno y sus servicios[57].

Como se indica en el Cuadro 1, el objetivo de la Estrategia de Resiliencia de Infraestructuras Críticas del Gobierno australiano es la operación continua de infraestructuras críticas frente a todas las amenazas. El enfoque político del Gobierno australiano respecto a las infraestructuras críticas lo reconoce[57]:

- La infraestructura crítica es esencial para la prosperidad económica y social de Australia;
- La infraestructura crítica resiliente desempeña un papel esencial en el apoyo a la comunidad en general y a la resiliencia ante los desastres;
- las empresas y los gobiernos comparten la responsabilidad de la resiliencia de la infraestructura crítica en Australia, lo que requiere de asociaciones sólidas; y
- todos los estados y territorios tienen sus propios programas de infraestructura crítica que se adaptan mejor a los entornos y acuerdos operativos de cada jurisdicción.

#### 8.2.1. Definiciones de la operación y a nivel de proyecto

El Marco de la PIARC no define la “criticidad”, pero varios casos de estudios recogidos por el CT E.1 utilizan esta noción para evaluar el impacto del cambio climático en las operaciones de las redes carreteras. En otras palabras, el propósito de la evaluación de la criticidad es identificar el impacto de las fallas (locales o regionales) en el desempeño de la red. Esto proporciona una base para establecer las prioridades de las medidas de adaptación que deben aplicarse. Según la metodología francesa de evaluación de riesgos, el desempeño de una red depende de los siguientes factores:

- Conectividad: ¿La red permite viajar de un lugar a otro? Por ejemplo, de una casa a un hospital o a una escuela, o de un departamento de bomberos a un área afectada por un incendio.
- Calidad de servicio: ¿Bajo qué condiciones de velocidad, confort, seguridad, confiabilidad, etc. de la red, permite a los usuarios viajar?

- Capacidad: ¿Cuántos usuarios pueden transportarse en la red simultáneamente? Las nociones de calidad de servicio y de capacidad están estrechamente relacionadas: cuanto más personas o mercancías tengan que ser transportadas al mismo tiempo y al mismo lugar, la calidad del transporte será inferior, con pérdida de tiempo, menor confiabilidad, congestión, largas filas, etc.
- Costos: Una red de transporte conlleva costos de construcción, mantenimiento y operación que se reflejan en los precios pagados por los usuarios o en el impuesto de los contribuyentes.
- Se pueden tener en cuenta otros parámetros, como el valor simbólico de una red.

Los peligros climáticos pueden provocar fallas que pueden producirse de forma aislada (por ejemplo, cuando una carretera es impactada por un deslizamiento de tierras; sin embargo, el resto de la red no se ve afectado) o al mismo tiempo (por ejemplo, inundaciones o vientos extremos y sus consecuencias, como la caída de árboles, pueden bloquear varias carreteras en el mismo sector). En ambos casos, estos peligros pueden tener un efecto menor en términos del desempeño de la red (las carreteras afectadas no están muy transitadas y hay carreteras alternativas disponibles; los usuarios todavía pueden viajar en condiciones casi normales) o pueden tener un impacto muy grave (los desplazamientos se hacen mucho más difíciles o incluso imposibles).

Estos impactos se miden con los factores de desempeño mencionados anteriormente. Como hay muchas maneras de combinar y medir estas variables, es necesario identificar qué criterios operacionales de la red incluirá la evaluación crítica. Esto depende de la finalidad de la evaluación de riesgos (véase la sección 6.1 sobre los objetivos y el alcance de la evaluación de riesgos). Por ejemplo, ¿Desea la autoridad de carreteras evaluar el impacto de una falla en la economía de su territorio y, por tanto, más concretamente, en los viajes regulares? ¿Desea identificar las redes que deben protegerse para los servicios de emergencia durante una crisis?

Por lo tanto, la evaluación de la criticidad requiere, en primer lugar, la identificación de los criterios funcionales de la red que deben evaluarse. El marco francés de evaluación de riesgos enumera las siguientes criterios funcionales de una red:

- Funciones esenciales de transporte: esta categoría incluye los movimientos que deben ser posibles en todo momento y a toda costa, especialmente si se produce un peligro. Esto incluye el acceso de los servicios de rescate, los servicios médicos, los bomberos, la policía, la evacuación de personas, el transporte militar, etc. Se trata esencialmente de una cuestión relacionada con la conectividad. Debe ser posible llegar a cualquier lugar desde cualquier lugar, dado que las soluciones que proporcionan esta conectividad pueden incluir la prohibición del acceso a las redes de transporte a otros usuarios, el diseño y la utilización de vehículos especiales, la utilización de otros modos de transporte, etc.
- Funciones de servicio o accesibilidad: en esta categoría se incluyen los movimientos relacionados con servicios esenciales, como el acceso a la alimentación, los servicios de salud, etc. Hay sustitutos disponibles para estos movimientos, por ejemplo, si una tienda de alimentos se vuelve inaccesible para las personas que viven en algún lugar, pero hay otra disponible, entonces no hay ningún problema en particular. Por otro lado, si todas las tiendas se vuelven inaccesibles, entonces las consecuencias pueden llegar a ser muy serias.
- Funciones de viajes regulares: esta categoría incluye todos los movimientos de personas y bienes que contribuyen al funcionamiento de la sociedad y, en particular, de la economía. La función de una red de transporte es permitir que estos movimientos se realicen en

buenas condiciones y, en particular, garantizar la seguridad. Desde el punto de vista de los usuarios (pasajeros y transportistas de mercancías), una falla operacional de la red de transporte se traduce en retrasos en el tiempo de viaje, la necesidad de posponer o reorganizar los viajes, o de diferir las actividades y transferirlas a un lugar distinto del lugar elegido, o incluso de cancelarlas. En una cadena de suministro, esto puede dar lugar a rupturas en los suministros, con consecuencias económicas que llegan hasta la quiebra y, por lo tanto, a la pérdida de puestos de trabajo. Algunas de estas cuestiones se analizan con más detalle en la sección 11.2.2.

### 8.2.2. Elección de las metodologías para la evaluación de la criticidad

Existen tres parámetros principales que influyen en la elección de la metodología de evaluación:

- a) Tipo de función a considerar.
- b) Alcance de la red y/o territorio en el área de estudio
- c) Disponibilidad de datos a esta escala.

El Marco francés, que incluye la metodología de evaluación de riesgos, proporciona orientación sobre cómo elegir la metodología de evaluación de la criticidad más adecuada en función de estos dos parámetros. Las metodologías se describen en el cuadro 2.

|                                    | Funcionalidad a evaluar                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                    | Función de transporte esencial                                                                                                                                                             | Función de servicio o de accesibilidad                                                                                                                                                     | Función de viajes regulares                                                                                                                                                                                                               |
| Principales criterios de desempeño | Conectividad                                                                                                                                                                               | Conectividad                                                                                                                                                                               | Calidad de servicio, capacidad, costos                                                                                                                                                                                                    |
| Tipo de metodología a utilizar     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluación de la inaccesibilidad basada en indicadores de conectividad</li> <li>- Identificación de las redes que deben ser protegidas</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluación de la inaccesibilidad basada en indicadores de conectividad</li> <li>- Identificación de las redes que deben ser protegidas</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluación de las pérdidas operacionales mediante un método basado en múltiples criterios</li> <li>- Evaluación de las pérdidas de operacionales con un modelo de tránsito/transporte</li> </ul> |
| Ejemplos de casos prácticos        | RESEAU <sup>2</sup> [28-31]                                                                                                                                                                | RESEAU <sup>2</sup>                                                                                                                                                                        | Evaluación de la criticidad de Dir Méditerranée en Francia[6; 20], y de la metodología multicriterio utilizada en Francia                                                                                                                 |

Tabla 2: Transición de las funcionalidades de la red a una evaluación de criticidad

El Proyecto Europeo SERON (<http://www.seron-project.eu/>) utiliza un enfoque similar para evaluar la criticidad (importancia de la red). Esto se detalla a continuación:

Paso 1: Selección de corredores viales e identificación de objetos de infraestructura potencialmente críticos

El objetivo del Paso 1 es identificar los elementos de la infraestructura potencialmente críticos y clasificarlos según su grado de criticidad.

Los operadores o propietarios de carreteras seleccionan el corredor vial que desean investigar. Podría tratarse de cualquier corredor de carretera del que sean responsables, por ejemplo, un corredor TEN-T<sup>4</sup> (Trans-European Transport Network - Red TransEuropea de Transporte). que tenga una función vital en la red general de carreteras de un país o dentro de la UE.

<sup>4</sup> <https://ec.europa.eu/transport/node/2443>

Tras esta etapa, deberán recopilarse los datos técnicos pertinentes de los elementos de la infraestructura a lo largo del corredor seleccionado y los datos de tránsito en el corredor. Esto incluye los datos técnicos generales de los puentes y túneles, tales como, la longitud, el tipo de construcción o el material utilizado. Los datos de la red de carreteras utilizados son el promedio de tránsito diario (TDP) y el porcentaje de vehículos pesados (HV, por su siglas en inglés) de transporte de mercancías. Todos los objetos de infraestructura en el corredor carretero seleccionado se deben investigar en función de su criticidad potencial.

#### Paso 2: Cálculo de la importancia en la red

En el paso 2, los objetos seleccionados en el paso 1 se clasifican según su importancia en la red. Para esta etapa se requieren datos detallados de la red de carreteras y se debe aplicar un modelo específico de tránsito y transporte.

La importancia en la red se define como el beneficio que se deriva de la no disponibilidad de determinados elementos de la infraestructura. La importancia en la red de un elemento de infraestructura carretera no sólo se refleja en las consecuencias de no disponer de él para el transporte por carretera, sino también en todos los impactos socioeconómicos. Por lo tanto, el procedimiento de evaluación desarrollado tiene en cuenta que los usuarios de la carretera, el volumen de tránsito, el propio objetivo de la infraestructura y la economía regional circundante también pueden verse afectados por la falta de la disponibilidad de estos elementos de la infraestructura. Las consecuencias resultantes se cuantifican, monetizan y se resumen en un valor de importancia final. Este valor de importancia describe el beneficio resultante del impacto evitado.

#### Cuadro 12: Una metodología para identificar las redes que deben ser protegidas: RESEAU<sup>2</sup>.

RESEAU<sup>2</sup> (Résilience des Acteurs de l'Urgence et Réseaux) es un enfoque que permite identificar las redes más importantes con el fin de definir aquellas que deben estar abiertas para el transporte de servicios de rescate o para facilitar el acceso de los habitantes a servicios esenciales como hospitales o centros de suministro (por ejemplo, para la alimentación), cuyo proceso se explica a continuación:

- el primer paso es identificar los centros críticos (hospitales, estaciones de bomberos, etc., es decir, los centros que deben permanecer operativos para limitar y resolver rápidamente una crisis);
- esto es necesario para deducir qué redes, y redes de transporte en particular, son esenciales para el funcionamiento de estos centros críticos; y
- y el último paso es determinar las medidas que permitirán que estas redes sigan funcionando bajo cualquier circunstancia.

Este enfoque es particularmente interesante para un gran número de amenazas, o peligros que puedan perturbar una gran parte de la red, y para amenazas cuya ocurrencia y consecuencias son difíciles de predecir. Este enfoque puede basarse en juicios de expertos, o mejor aún, si se dispone de información sobre acontecimientos pasados, datos como la duración de la interrupción de una red o el número de vehículos que se han desviado pueden ser útiles para identificar las redes críticas y/o las medidas necesarias para la adaptación.

*Fuente:* CEREMA. Estrategia operativa - Valle del Ródano en Drôme-Ardèche, 2009. [29-31]

En el Cuadro 13 se examina el tema de la criticidad en el contexto de la redundancia. Este tema debe considerarse como parte del próximo ciclo en el perfeccionamiento del Marco de la PIARC.

### Cuadro 13: Evaluación de la criticidad de los viajes regulares: un ejemplo basado en un Análisis Multicriterio

La evaluación de la criticidad también puede centrarse en el desempeño de la red para los viajes regulares de personas y mercancías. Como los modelos pueden no estar disponibles para cada red, y como el diseño de modelos requiere mucho tiempo y es costoso, se puede utilizar un Análisis Multicriterio.

Ya se ha aplicado un método multicriterio para evaluar la criticidad de una red en una conurbación francesa. Por lo tanto, la red se ha dividido en tramos de carretera. Para cada tramo se han evaluado los siguientes indicadores de criticidad: el tránsito, su estructura (interna, los intercambios, la composición o una combinación de los tres), las vías alternativas y su capacidad de absorción del tránsito que pudo haber sido desviado del tramo evaluado (en caso de que este tramo se hubiera cerrado). Las secciones se clasificaron en cuatro grupos:

- "poca importancia": Al menos una de las carreteras alternas tiene una gran capacidad disponible;
- "importancia moderada": las carreteras alternas sólo tienen una capacidad disponible moderada;
- "alta importancia": Se dispone de una carretera alterna de baja capacidad, y una o dos carreteras alternas tienen una capacidad disponible moderada; y
- "muy importante": Las carreteras alternas tienen muy poca capacidad disponible, o no hay carreteras alternas.

*Fuente:* CEREMA. Analyse de risque "Nancy-Brabois", 2016. [5]

En este estudio, la red de transporte se evalúa como crítica si es altamente utilizada y no hay "buenas" opciones alternas para los usuarios. El análisis multicriterio se discute con más detalle en la Sección 9.

#### 8.2.3. Valoración de la criticidad

De la misma manera que se realiza una valoración de la de sensibilidad y vulnerabilidad, también es posible valorar la criticidad (la cual puede ser evaluada sobre una base semicuantitativa o totalmente cuantitativa) mediante el desarrollo de una escala específica que describa el alcance potencial del impacto de cada una de las amenazas climáticas para la agencia de carreteras. Es necesario prestar especial atención a los niveles de la escala si se espera que los resultados de la evaluación de la criticidad se comparen entre diferentes estudios para evaluación de riesgos.

En Alemania se ha aplicado un enfoque cuantitativo para evaluar la criticidad. Más información en: [http://www.seron-project.eu/download/SeRoN\\_D400\\_ImportanceStructuresTrafficNetwork\\_summary\\_1.1.pdf](http://www.seron-project.eu/download/SeRoN_D400_ImportanceStructuresTrafficNetwork_summary_1.1.pdf)

## 9. ¿CÓMO SE APLICA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS?

Como se indica en la Figura 3 de la Sección 6.2, una evaluación holística del riesgo implica el análisis y la priorización de los diferentes riesgos relevantes para una infraestructura/proyecto, y la clasificación de los activos, ubicaciones y operaciones carreteras de acuerdo con el nivel de probabilidad de riesgo (probabilidad de impactos futuros sobre el activo) y la severidad (consecuencia de los impactos sobre el activo). La evaluación y priorización de riesgos dentro de la Etapa 2 del Marco de la PIARC describe que el riesgo es una función de probabilidad y la severidad/gravedad. La evaluación de riesgos también tiene por objeto proporcionar una lista de riesgos prioritarios, en la que los riesgos extremos elevados serían el centro de una respuesta de adaptación[55].

Por lo tanto, este paso implica priorizar los riesgos mediante la valoración de la severidad de los impactos de cada uno de ellos, así como la identificación de los riesgos que requieren mayor atención (AGO en[54]). Esta sección cubre lo siguiente:

- identificar el tipo de cronología y escenarios para la evaluación de riesgos
- evaluación de la probabilidad de impacto (posibilidad)
- evaluación de la severidad/gravedad del impacto (consecuencias)
- establecer puntuaciones de riesgo y un registro de riesgos
- comparar los riesgos con otros tipos de riesgos
- determinar qué áreas de riesgo son aceptables y cuáles requieren mayor atención.

Es importante señalar que a menudo las palabras "amenaza" y "riesgo" se utilizan indistintamente en la literatura. Sin embargo, el riesgo no es sinónimo de amenaza, aunque están estrechamente relacionados, los dos son significativamente diferentes. En muchas circunstancias, una "amenaza", o amenazas, proporcionará una fuente para uno o más riesgos. Es la interacción entre la amenaza y alguien o algo, en una instancia particular o durante un período de tiempo lo que creará el riesgo. Las amenazas pueden existir, pero no representan un riesgo.

En general, se utilizan tres tipos de metodologías de evaluación de riesgos:

- Casos de estudios tales como estrategias o políticas de guía, evaluaciones desarrolladas para amplias zonas geográficas, incluidas no sólo las redes de carreteras, sino también los ferrocarriles, las vías navegables, etc., o evaluaciones para las que se dispone de unas pocas bases de datos sobre especificaciones de activos que utilizan un enfoque cualitativo o semicuantitativo.
- La evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo en zonas geográficas más pequeñas (por ejemplo, una ciudad) o centrada en un único tipo de red en una zona geográfica extensa (por ejemplo, una red de carreteras de cientos de kilómetros) también se basa en evaluaciones cualitativas y semicuantitativas.
- Las evaluaciones de vulnerabilidad y riesgo de activos muy específicos (como puentes o un pequeño tramo de carretera) pueden basarse en evaluaciones semicuantitativas o cuantitativas.

En el cuadro 3 se ofrece un ejemplo de los tipos de evaluación de riesgos que podrían realizarse. Esto pone de relieve la consideración de las evaluaciones cualitativas, semicuantitativas y cuantitativas.

| Cualitativo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Semicuantitativo                                                                                                                                                                                                                | Cuantitativo                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estrategias o políticas de guía</li> <li>- Evaluación de riesgos con varias redes en áreas geográficas amplias</li> <li>- Evaluación de riesgos con unos pocos datos/recursos humanos/económicos disponibles</li> <li>- Primer paso de una evaluación semicuantitativa o cuantitativa del riesgo</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluación de riesgos en áreas geográficas intermedias</li> <li>- Evaluación de riesgos centrada en una red específica, incluso si el área geográfica de estudio es amplia.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluación de riesgos de activos específicos para los que se dispone de modelos</li> </ul> |

Cuadro 3: Tipos de evaluaciones de riesgos

Los enfoques cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos pueden combinarse de manera iterativa. En el caso de una evaluación de la vulnerabilidad, si ésta se lleva a cabo en una red muy amplia, muestra que algunos activos específicos son más vulnerables, para ello podría ser pertinente realizar una evaluación cuantitativa de estos activos específicos.

En los casos de estudios identificados, hay una serie de enfoques que aplican una evaluación de riesgos. Estos incluyen

- Enfoques de arriba hacia abajo, por ejemplo, tomando un método/marco existente e implementando estos conceptos.
- Enfoques basados en indicadores.
- Análisis cuantitativo de riesgos y análisis probabilístico de riesgos.

Cabe señalar que se han elaborado una serie de casos de estudios en los que se demuestran diversos marcos y metodologías. Algunos de estos incluyen:

- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambio climático. (2012). Gestionar los riesgos de eventos extremos y desastres para avanzar en la adaptación al cambio climático (Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation). Suiza
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2013). Integración de la Gestión de Riesgo de Desastres y la Adaptación al Cambio Climático en la Inversión Pública (Integration of Disaster Risk Management and Adaptation to Climate Change in Public Investment). Washington, DC
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2015). Opciones de gestión del riesgo de cambio climático para el sector del transporte. Hojas informativas. Washington, DC, EE.UU.

- Conferencia de Directores Europeos de Carreteras (CEDR). (2010). Gestión de riesgos para las carreteras en un clima cambiante. Una guía sobre el método RIMAROCC. ERA-NET ROAD.

En esta sección se ofrece un resumen de algunos de los enfoques que se han identificado como ejemplos de los enfoques antes mencionados.

### 9.1. ENFOQUE DESCENDENTE (TOP-DOWN)

En el caso de México, se ofrece un ejemplo de la aplicación de un enfoque descendente.

En los últimos años, México ha enfrentado un número creciente de desafíos debido a eventos hidrometeorológicos extremos como ciclones tropicales, inundaciones y sequías. Para atender la adaptación al cambio climático, se elaboraron diversos mapas, en el que se examinaba el fenómeno climático (peligro), la exposición y la vulnerabilidad. El análisis de vulnerabilidad considera un Índice de vulnerabilidad en salud, un Índice de vulnerabilidad social e índices de vulnerabilidad agrícola (Índice de vulnerabilidad a la temperatura agrícola, Índice de vulnerabilidad a la precipitación e Índice de vulnerabilidad ganadera). El peligro se define como una función de la frecuencia de ocurrencia de eventos, medida por su período de retorno que afecta a un sector específico.

La infraestructura estratégica social y económica también está expuesta a eventos catastróficos. La infraestructura estratégica social y económica se refiere al medio ambiente urbano, la salud, la educación, la energía, las comunicaciones, el turismo y el comercio. Si se lleva a cabo una evaluación temprana, esto permite disponer de tiempo y recursos sustanciales para evaluar los activos estratégicos que se encuentran en zonas de alto peligro.

Los desastres naturales han tenido históricamente un gran impacto en la infraestructura. Por lo tanto, México ha utilizado la base de datos DESINVENTAR<sup>5</sup>, que ha ayudado a identificar estos efectos e impactos y su ubicación geográfica. Hay muchos eventos naturales que pueden afectar a la infraestructura carretera y en esta sección se describe cada uno de ellos en detalle. Las tormentas han aumentado tanto en frecuencia como en intensidad, causando lluvias extremas, caídas de árboles, visibilidad inadecuada y fuertes vientos. Esto ha conducido a una alta presencia de agua y a su acumulación, causando inundaciones, erosión de los cauces de los ríos, aumento de la presencia de agua en la superficie de la carretera y alta penetración del agua en las laderas naturales. Un drenaje insuficiente de las aguas pluviales puede conducir a la inestabilidad de las estructuras, a la pérdida de infraestructura, a cambios en los períodos de retorno, y a accidentes vertiginosos. Por otro lado, la sequía o el déficit de agua también tiene consecuencias graves, entre las que se incluyen: el uso excesivo de materiales secos para la compactación en la construcción de carreteras, la humedad insuficiente para mantener la cubierta vegetal, lo que aumenta la erosión, los incendios forestales y de matorrales, la pérdida de cohesión entre las diferentes capas de pavimento y el asentamiento de las estructuras del pavimento. Además, la infraestructura carretera puede verse afectada por los cambios de temperatura, es decir, por el aumento de la temperatura. Esto puede provocar deformaciones en el pavimento, accidentes de tránsito, aumento del consumo de energía debido a la climatización de los vehículos, daños en los vehículos y daños en el bien transportado.

---

<sup>5</sup> Sistema de inventario de efectos de desastres, <http://www.desinventar.org/es/>

En la implementación del Marco en México, la evaluación de riesgos se realizó a través de las metodologías y mapas desarrollados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)<sup>6</sup>, para los diferentes tipos de amenazas climáticas, tales como inundaciones, olas de calor, fenómenos hidrometeorológicos, etc.

- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2012). Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos. México, DF (descargar en [www.anr.gob.mx/Descargas/Metodologias/Hidrometeorologico.pdf](http://www.anr.gob.mx/Descargas/Metodologias/Hidrometeorologico.pdf))
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2016). Metodología para elaborar mapas de riesgo por Temperaturas máximas (1ª etapa ondas de calor). México, DF

## 9.2. ENFOQUES BASADOS EN INDICADORES

### 9.2.1. Resiliencia y evaluación del riesgo climático: experiencias de la infraestructura vial en Alemania

Hay tres principales grupos que pueden ser afectados por el desempeño de la infraestructura carretera. Estos son el usuario, el propietario y/o el operador. Para el usuario, el propietario y el operador, la resiliencia se refiere a la confiabilidad de la carretera, la seguridad en la carretera y la disponibilidad de las carreteras para viajar. Para el usuario, éstos se ven influidos en gran medida por la demanda de movilidad, la calidad de vida y la competitividad. Para el propietario y el operador, éstos se ven influidos por la oferta de movilidad, el cambio climático y el envejecimiento de la infraestructura. La oferta de movilidad, aunque cada vez más compleja, puede administrarse mediante soluciones de innovación y gestión inteligente que sean interdisciplinarias y multimodales.

El cambio climático, las amenazas naturales y los fenómenos meteorológicos extremos pueden afectar a la infraestructura carretera de muchas maneras; por lo tanto, la infraestructura vial debe ser resiliente. Esto puede lograrse mediante la adaptabilidad, la robustez, la durabilidad y la recuperación de la infraestructura. Al evaluar estos impactos, los Marcos de clasificación o evaluación del impacto del clima y de las amenazas naturales pueden proporcionar una perspectiva integrada sobre las complejas interdependencias del transporte y las redundancias para la conectividad. Un gran componente de este proceso es un análisis de riesgo para evaluar la exposición, vulnerabilidad y criticidad desde el nivel de red hasta el nivel de activo.

Debido a la necesidad de análisis de riesgos, se desarrolló un proyecto de I+D denominado "RIVA" (Risk and Vulnerability Assessment - Evaluación de riesgo y vulnerabilidad) que proporciona una evaluación de las principales zonas de tránsito de la red de carreteras federales en el contexto del cambio climático. Esto plantea las siguientes preguntas:

- ¿Qué elementos y activos de las carreteras son propensos a riesgos climáticos específicos?
- ¿Cómo podemos evaluar el nivel de peligro y riesgo de manera sistemática?
- ¿Hasta qué punto es posible un análisis de riesgos sistemático a nivel de red?

La metodología del modelo RIVA sigue un proceso de identificación, análisis y evaluación de los elementos de riesgo, consecuencias y causa-efecto. Se seleccionaron corredores de prueba para la aplicación del modelo RIVA con diferentes climas y geografías, volumen de tránsito (bajo, medio,

---

<sup>6</sup> <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>

alto), tipo de construcción, edad, condición, TEN-T y conectividad internacional. Se identificaron nueve tramos de entre 60 y 130 km de longitud, y 1200 km de la red federal de carreteras. El modelo identifica el riesgo climático, los elementos en riesgo y estima el potencial de criticidad/riesgo a través de un índice de riesgo.

En la Tabla 4 se ofrece otro ejemplo del enfoque basado en indicadores de vulnerabilidad sobre la exposición y algunas características asociadas, donde se establece el componente de vulnerabilidad, el indicador, el tipo de activo en particular, la gama de factores estresantes y la ubicación del proyecto).

| Componente de vulnerabilidad | Indicador                                              | Tipo de Activo                        | Estrés                                           | Ubicación del estudio piloto |
|------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|
| Exposición                   | Elevación relativa a la zona de inundación más cercana | Carretera, puente, alcantarilla, etc. | Inundaciones costeras<br>Precipitaciones fuertes | Sur de la Florida            |

Tabla 4: Ejemplo de indicadores de vulnerabilidad basados en estudios piloto de FHWA<sup>7</sup>.

Fuente: FHWA (2016)

### 9.2.2. Evaluación de los riesgos de los fenómenos climáticos extremos en las infraestructuras y redes para el futuro: un marco de evaluación de riesgos en Francia

En el marco del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) de Francia, CEREMA y sus socios han definido una metodología armonizada para evaluar las vulnerabilidades, la criticidad y el riesgo de la infraestructura y los servicios de transporte para las redes terrestres, marítimas y aeroportuarias. El objetivo del PNACC es establecer una declaración de vulnerabilidad y criticidad de las redes de transporte terrestre, marítimo y aéreo en la Francia continental y en los territorios franceses de ultramar y preparar estrategias de respuesta adecuadas y escalonadas a los problemas locales y mundiales del cambio climático.

La metodología de evaluación se ha aplicado, por ejemplo, en una gran red de carreteras de propiedad estatal en el sudeste de Francia (DIR Méditerranée)[6; 20]. El primer paso del estudio consistió en definir los objetivos y el alcance del mismo, y en crear un grupo de trabajo adecuado con diversos especialistas y con la agencia de carreteras (véase la Sección 6.2). El grupo de trabajo había llevado a cabo una evaluación de los eventos extremos mediante la enumeración y selección de los eventos extremos climáticos pertinentes (véase la Sección 7.2) utilizando varias bases de datos de eventos pasados, presentes y futuros, entre los que se encontraban DRIAS<sup>8</sup> y Climat HD (véase la Sección 7.3). Las características actuales y proyectadas de los eventos han sido analizadas

<sup>7</sup> Entre 2013 y 2015, FHWA (2016) llevó a cabo un programa piloto de resiliencia climática para evaluar las opciones para mejorar la resiliencia y sintetizar las lecciones aprendidas en la evaluación de la vulnerabilidad del transporte y la evaluación de las opciones para mejorar la resiliencia. Como parte de este proyecto, se elaboró una lista consolidada de indicadores de vulnerabilidad utilizados en una serie de proyectos piloto y estos indicadores se dividen en los componentes de vulnerabilidad de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación.

<sup>8</sup> <http://www.drias-climat.fr/>

en cuanto a frecuencia, ocurrencia espacial y ocurrencia temporal. Esto permite asignar un puntaje a cada evento extremo de acuerdo a la evolución proyectada de su intensidad o ocurrencia (ver Sección 7.4).

Posteriormente se utilizan criterios para generar indicadores de vulnerabilidad, que se basan en cómo los fenómenos climáticos específicos afectarán físicamente a los diferentes componentes de la infraestructura vial de la red (véase la sección 8.1.4). La evolución de las vulnerabilidades se ha evaluado combinando la valoración de la vulnerabilidad y la valoración de los eventos extremos.

Paralelamente, se evalúa la criticidad de la red principalmente para la función de viajes regulares; por ejemplo, sobre la base de criterios relacionados como la carga de tráfico y la economía del territorio. Por lo tanto, ha sido necesario identificar la posibilidad de que se produzcan interrupciones en las carreteras incluso sin daños en la infraestructura, que están asociados a los fenómenos climáticos.

Una vez que se obtiene una evaluación de la criticidad, ésta también se puede evaluar con la valoración de criticidad que se ha combinado con la evaluación del riesgo. Esto influirá en el desarrollo de medidas y estrategias de adaptación. En el marco del PNACC, CEREMA y sus socios también han analizado qué normas utilizadas actualmente para el diseño, mantenimiento y operación de la infraestructura de transporte deben adaptarse al cambio climático. Actualmente se está llevando a cabo la adaptación de estas normas. Este es un ejemplo de adaptación del transporte (véase el apartado 10.1.1).

Están en curso otros trabajos para la aplicación del Marco. Por ejemplo, aplicarlos a un gran centro urbano con muchas redes de transporte, carreteras nacionales y locales, así como al transporte público, y a un gran puerto.

### **9.3. ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS, EVALUACIÓN Y ENFOQUE PROBABILÍSTICO PARA EL ANÁLISIS DE RIESGOS**

#### **9.3.1. Estudio de resiliencia al clima: aspectos destacados, resultados y próximos pasos. (U.S. FHWA)**

En 2012, la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos de América (FHWA, por sus siglas en inglés) desarrolló un Marco de evaluación ante el cambio climático y de la vulnerabilidad climática extrema (ejemplo semicuantitativo). Este Marco define el alcance del proyecto, evalúa las vulnerabilidades e integra la vulnerabilidad en la toma de decisiones. Este Marco fue desarrollado después de financiar cinco estudios piloto para la evaluación de la vulnerabilidad en agencias de transporte de todo el país. Se centra principalmente en la realización de una evaluación de la vulnerabilidad mediante la determinación de la vulnerabilidad en función de la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación. También se refiere brevemente a la integración de los resultados en la toma de decisiones. Aunque, cuando se elaboró la primera versión del Marco en 2012, se observó que había algunas lagunas que era necesario llenar, por ejemplo, se necesitaban ejemplos para los Estados no costeros, no se incluían los impactos climáticos debidos al cambio de las temperaturas, no se incluía la forma de incorporar los efectos de los cambios en los patrones de precipitación, y no se contemplaba la incorporación de estas evaluaciones de la vulnerabilidad en la toma de decisiones. Por lo tanto, se emprendió una segunda ronda de diecinueve estudios piloto para garantizar que las agencias de transporte de todo el país pudieran utilizar el Marco y eliminar el déficit de su aplicabilidad.

Un ejemplo de uno de estos estudios es el enfoque de tres niveles adoptado en Maryland, que evaluó la vulnerabilidad de los activos en dos condados diferentes. El Nivel I cartografió el aumento proyectado del nivel del mar, la altura del oleaje de tormenta y las inundaciones fluviales, y se revisaron los activos expuestos a estos factores de estrés climático. El nivel II utilizó un enfoque basado en indicadores para evaluar la vulnerabilidad de los puentes y las carreteras. El nivel III se basó en los resultados de los dos primeros niveles para establecer las medidas de adaptación sobre una base específica para cada lugar, aunque esto quedaba fuera del alcance del estudio piloto. Maryland también está utilizando los mapas que desarrolló como parte de este programa piloto para considerar los impactos del aumento del nivel del mar en la evaluación ambiental. Por ejemplo, todos los proyectos de obras viales menores financiados por el gobierno federal en los condados costeros necesitan llenar un formulario para recibir la autorización ambiental. El formulario pregunta si el trabajo se llevará a cabo en un área potencialmente impactada por el cambio en el nivel del mar basado en los mapas. En caso afirmativo, señala que el proyecto debe tener en cuenta el cambio del nivel del mar.

Otro ejemplo es el de Massachusetts. El Departamento de Transporte de Massachusetts (MassDOT) utilizó un modelo hidrodinámico para desarrollar una serie de mapas que muestran la probabilidad de inundación por el aumento del nivel del mar y de las mareas de tormenta en cualquier lugar del área de Boston actualmente, y para el año 2030, 2070 y 2100. Utilizaron estos mapas para predecir las vulnerabilidades de la infraestructura de transporte. Por ejemplo, revisando el portal de un túnel, lo que encontraron en un lugar en particular, fue que las barreras temporales serían suficientes para protegerse de una tormenta de 1,000 años en el corto plazo (para lo cual fue diseñado el túnel), pero debido a la elevación del nivel del mar, se necesitaría una protección más completa, tales como las compuertas herméticas para el año 2030.

El siguiente párrafo es un breve resumen de los resultados de algunos de los otros proyectos piloto. Los resultados del piloto del Distrito 1 de Caltrans informan estudios sobre la carretera “US 101”, en el cual están ayudando a una agencia de transporte local a evaluar las opciones de elección de ruta a través de un río. Caltrans (Departamento Californiano de Transporte) replicó su estudio del Distrito 1 para el resto de los Distritos del Estado de California. El DOT (Departamento de Transporte) de Connecticut planea actualizar su Manual de Drenaje en Carreteras debido a su estudio piloto. El MPO (Metropolitan Planning Organization - Organismo de Planificación Metropolitana) del Área Capital y el MPO de Hillsborough han incorporado la evaluación de vulnerabilidad en sus Planes de Transporte a largo plazo (para el año 2040). El Departamento de Transporte de Michigan (MDOT) está añadiendo nuevos campos a sus sistemas de gestión de activos para mostrar los resultados de la evaluación de vulnerabilidad. El Departamento de Transporte de Iowa está añadiendo datos generados durante el proyecto piloto en su programa “Bridge Watch” para ayudar a los responsables de la toma de decisiones en adoptar un enfoque proactivo de la seguridad pública durante los posibles eventos de desbordamiento. La Administración de Carreteras del Estado de Maryland está utilizando los resultados del programa piloto para delinear los lugares costeros vulnerables a las inundaciones para ayudar a seleccionar nuevos planes de proyectos y diseñarlos para futuros impactos climáticos.

Las recomendaciones del programa piloto para la FHWA incluyeron: refinar aún más el Marco para reflejar las lecciones aprendidas de los proyectos piloto, proporcionar recursos para ayudar a evaluar los costos y beneficios de las estrategias de adaptación, facilitar la coordinación con el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers) y otras

agencias federales, y ayudar a asegurar financiamiento adicional para el análisis y la implementación de estrategias de adaptación. Se determinó que se necesitaba más información sobre datos completos y accesibles sobre los activos, datos históricos sobre los efectos y el costo, e información sobre los valores de los costos y los beneficios. También se determinó que se necesitaban instrumentos de orientación para ayudar a utilizar la información sobre el clima, las evaluaciones de la relación costo-beneficio y la integración de los resultados de las evaluaciones de la vulnerabilidad y la adaptación en la planificación del transporte. La FHWA publicó una versión actualizada de su Marco en diciembre de 2017.

### 9.3.2. INFRARISK

El proyecto INFRARISK, aplica diversos enfoques y metodologías de las pruebas de esfuerzo, utilizando herramientas de modelización integradas para apoyar la toma de decisiones. Se trata de establecer la resiliencia de la infraestructura crítica a los anómalos eventos extremos de baja frecuencia, y de ayudar a la toma de decisiones sobre el desarrollo de una infraestructura robusta y la protección de la infraestructura existente. Esto se ha logrado mediante el desarrollo de un marco de análisis operativo que considera el impacto de las amenazas individuales en los sistemas de infraestructura específicos y las interdependencias combinadas de la infraestructura crítica, abordando la complejidad de los escenarios de "Known Unknowns" (Desconocimientos conocidos) y "Unknown Unknowns" (Desconocimientos desconocidos) a través de modelos robustos de riesgo e incertidumbre.

Se dispone de un Marco general para la evaluación de los diferentes tipos de peligros. Este Marco se basa en la armonización de modelos probabilísticos, que estiman un conjunto de medidas de intensidad en los sitios vulnerables basadas en la ocurrencia de eventos, teniendo en cuenta varias incertidumbres. Los parámetros específicos de cada tipo de peligro se resumen en una matriz de distribución de peligros. Sobre la base de los modelos de amenazas, se ha elaborado un Marco para la armonización de los modelos de fragilidad. Se identifican las fuentes de incertidumbre que intervienen en el proceso de evaluación de riesgos para los diferentes tipos de peligros.

Existen herramientas (software) y guías prácticas que ayudan a los propietarios y operadores de infraestructura carretera a evaluar la probabilidad de que se produzcan eventos extremadamente raros y a evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura crítica.

## 10. SELECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE LAS MEDIDAS Y RESPUESTAS DE ADAPTACIÓN

Se han considerado una amplia gama de medidas de adaptación a nivel internacional, que se han identificado y aplicado sobre la base de su propósito, la ubicación, el costo y los plazos de aplicación. La matriz desarrollada para este informe (como se describe en la Sección 5.4), indica que existe considerable información disponible sobre los tipos de medidas y respuestas de adaptación, incluidas las medidas estructurales, operativas, organizativas y de planificación. Sobre el seguimiento de la eficacia de las medidas de adaptación, se dispone de menos casos de estudio; sin embargo, se han identificado algunos ejemplos específicos en Queensland, Australia, con las pruebas reales de estabilización con asfalto espumado resultantes de los recientes ciclones.

En esta sección se esbozan los tipos de medidas y respuestas de adaptación que se están aplicando a nivel internacional y se analiza su aplicación en términos de las necesidades de adaptación y la vigilancia de esas medidas.

### 10.1. LA DETERMINACIÓN DE LOS TIPOS DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

Dado que la infraestructura de transporte implica inversiones a largo plazo con una vida útil de 20 a 40 años, y en puentes de hasta 100 años, por ello es necesario comprender los impactos previstos del cambio climático futuro durante la vida útil de los activos. Esto podría permitir un considerable ahorro de costos en el largo plazo, evitando el reemplazo de infraestructura dañada, si se advierte a los profesionales y a los responsables de la toma de decisiones de cualquier efecto futuro costoso en la infraestructura existente, es posible prepararse mejor para estos eventos [32]. Una forma de prepararse para futuros impactos climáticos es a través de la identificación, priorización, implementación y monitoreo de medidas de adaptación para aumentar la resiliencia de las redes y asegurar que los niveles de riesgo sean aceptables, y que se mantengan los niveles actuales de servicio. Estas respuestas sirven de guía para los profesionales y pueden variar ampliamente en términos de la factibilidad de la implementación (costo, recursos y viabilidad técnica). Algunos pueden ser incluidos en los programas de mantenimiento existentes, mientras que otros requieren inversiones de capital independientes[4]. Como tal, existe un vínculo directo entre las estrategias de adaptación y, de la disminución de la probabilidad y de las consecuencias de los impactos del cambio climático. Esta vinculación se describe en una evaluación de riesgos del cambio climático [58] desarrollada por VicRoads (Roads Corporation of Victoria - Corporación de Caminos de Victoria, Australia), mostrada en la Figura 4, que muestra los diferentes tipos de eventos de cambio climático, sus impactos y consecuencias en las carreteras, y las estrategias de adaptación sugeridas para disminuir la probabilidad y las consecuencias de los impactos.



Figura 4: Estrategias de adaptación para disminuir la probabilidad y las consecuencias de los impactos del cambio climático. Fuente: Adaptado de Melillo, Richmond y Yohe (2014), citado en VicRoads (2015).

Según la FHWA[33], las soluciones de adaptación pueden ser naturales, estructurales o basadas en políticas y pueden variar desde específicas para cada sitio, hasta regionales. Las medidas de adaptación pueden incluir

- Nueva infraestructura para resistir las condiciones ambientales previstas en el futuro
- Retroadaptar la infraestructura existente a un estándar que incluya la resiliencia a los efectos previstos del cambio climático y diseños a prueba de impactos futuros.
- Mayor redundancia del sistema para garantizar la existencia de otras alternativas de infraestructura para los servicios de transporte (por ejemplo, construcción de rutas de acceso alternativas y planes de contingencia).
- Reubicar activos para evitar daños
- Establecer programas de mantenimiento intensivos o específicos (por ejemplo, mantenimiento y monitoreo de los sistemas de drenaje)
- Integrar los hallazgos en la planificación del sistema
- Mejorar los planes de operación para emergencias meteorológicas, incluyendo sistemas de alerta temprana, medidas y procedimientos reactivos (por ejemplo, mejorar la comunicación con la sociedad antes, durante y después de los eventos, o la resiliencia de las cadenas de suministro, así como la dependencia de un contratista de mantenimiento, puede dar lugar a dificultades si el lugar es inaccesible después de un evento)[33; 34].

Para los efectos del presente informe, las medidas antes mencionadas se han documentado de acuerdo con las categorías de la matriz del Grupo de Trabajo del Comité Técnico. Éstos se describen en el Cuadro 5 y se han ampliado en las subsecciones siguientes.

| Medidas de adaptación<br>(relacionadas con la<br>infraestructura)                                                                                                                                                                                                        | Medidas de adaptación<br>(gestión de riesgos en<br>la operación)                                                                                                                             | Medidas de adaptación<br>(medidas de<br>mantenimiento)                                                                  | Medidas de adaptación<br>(Planificación)                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidas de adaptación carretera</li> <li>• Reingeniería del puente, ....</li> <li>• Túnel (protección contra inundaciones, ...)</li> <li>• Estructuras de contención</li> <li>• Rutas de evacuación</li> <li>• Otros</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS)</li> <li>• Sistemas de alerta temprana</li> <li>• Desvío de ruta (a corto plazo y planificado)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Periódico</li> <li>• Rutinario</li> <li>• Restauración del servicio</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Integración del cambio climático en la fase de diseño</li> <li>• Reglamentos técnicos</li> <li>• Adaptación de la normativa vigente al cambio climático</li> <li>• Marcos jurídicos</li> <li>• Otros</li> </ul> |

Tabla 5: Medidas de adaptación para la infraestructura, la gestión de las amenazas en el tránsito (operación), el mantenimiento y la planificación

Las medidas de adaptación pueden definirse como medidas duras<sup>9</sup> (por ejemplo, muros de contención para protegerse de la erosión, diques, superficies alternativas), y también implican el uso de medidas blandas (por ejemplo, creación de humedales, islas de barrera, infraestructura verde para hacer frente a fenómenos como precipitaciones severas, el establecimiento de estructuras de control y gestión bien preparadas, el suministro de sistemas de información adecuados o formación de personal para la atención de desastres), o la puesta en práctica de estrategias y medidas de planificación (por ejemplo, modificaciones de reglamentos o normas). Además, según Petkovic et al. (2008), las medidas de adaptación pueden clasificarse como:

- Medidas para nuevas carreteras: diseño y construcción adaptados al clima
- Medidas para las redes de carreteras existentes: operación y mantenimiento adaptados al clima
- Medidas de preparación adaptadas a un clima más exigente
- Desarrollo de una base de conocimientos para la adaptación al clima.

<sup>9</sup> Según el proyecto ACRP adapt2to4, de Austria, las define como "adaptación gris", en virtud de las cuales las inversiones reactivas suelen ser elevadas y pueden tener un gran impacto en los ecosistemas. Además, el informe define la "adaptación verde" como una adaptación de bajo costo y sin arrepentimiento (no regret), ya que apoya, mantiene o amplía los servicios ecosistémicos existentes. A menudo implica previsión y acción proactiva y debería aplicarse antes de que se produzcan daños excesivos (por ejemplo, deforestación o reforestación de bosques para retener los movimientos masivos en avalanchas/aluviones). La "adaptación blanda" también puede ofrecer una solución no invasiva, de bajo costo y puede ser implementada sin implicaciones para los ecosistemas (por ejemplo, zonificación de inundaciones, alternativas que permitan el cambio modal para todas las conexiones arteriales).

El Marco Internacional para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera de la PIARC proporciona un listado de respuestas de adaptación en función de los impactos del cambio climático, y también muestra algunos casos de estudios de adaptación. En los recuadros del 14 al 26 se identifican algunos casos de estudio específicos de las medidas de adaptación y las respuestas recogidas por el Grupo de Trabajo encargado del CT E.1.

#### 10.1.1. Medidas de adaptación relacionadas con la infraestructura

Esta sección detalla algunas soluciones como medidas de adaptación para la infraestructura, tanto medidas duras como blandas. En términos de soluciones duras, las medidas de adaptación aplicables a los pavimentos alternativos están siendo consideradas internacionalmente. Algunos ejemplos incluyen tratamientos como la estabilización asfalto espumado que se ha utilizado para devolver a los activos el nivel equivalente (antes de los daños) y mejorar la resiliencia del pavimento. El asfalto espumado se forma inyectando una pequeña cantidad de agua fría en el asfalto caliente para producir una expansión instantánea. En este estado de espuma, el asfalto es muy eficaz para humedecer y recubrir las partículas más finas del material del pavimento, formando un mortero uniendo la mezcla. En Queensland, Australia, gran parte de la red de carreteras se construye sobre suelos extensos, creando efectos de contracción e hinchazón que dañan las carreteras. Las inundaciones experimentadas durante los fenómenos meteorológicos extremos también ponen de relieve los problemas de resiliencia de algunos tipos de pavimentos tradicionales, por lo que cuando se utilizan en entornos adecuados con una estabilización adecuada, el asfalto espumado ofrece una resiliencia mucho mayor, así como un mejor comportamiento ante la fatiga y un mejor comportamiento en comparación con los pavimentos tradicionales<sup>10</sup>. Véase en la sección 10.2 un ejemplo de la eficacia de esta medida de adaptación. Cabe señalar que éste es sólo un ejemplo y que se pueden considerar otras medidas en función de las circunstancias climáticas de los países.

---

<sup>10</sup> Taller Técnico de la PIARC: International Adaptation Strategies and Increasing the Resilience of Infrastructure, Brisbane, mayo de 2017.

#### Cuadro 14: Análisis de las normas que requieren adaptación para el diseño, el mantenimiento y las operaciones carreteras (Francia)

En el marco del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Francia, CEREMA publicó en 2015 un informe sobre la adaptación de las normas para diseñar, mantener y operar todo tipo de redes, incluidas las carreteras, al cambio climático. Por lo tanto, se creó un grupo de trabajo compuesto por especialistas en distintos tipos de infraestructuras: carreteras, vías navegables, puertos, aeropuertos, ferrocarriles, teleféricos, etc., de diversos institutos asociados.

El informe describe en primer lugar las tendencias del cambio climático a escala francesa y la evolución potencial de los peligros o de las variables relacionadas con el clima para las redes de transporte, tales como: altas y bajas temperaturas, precipitaciones (incluidos los ciclos de congelación-descongelación, nieve y movimientos del suelo), viento, elevación y oleaje del mar, biodiversidad. El informe ofrece una descripción general de los posibles impactos de los peligros actuales y futuros en las redes, en los activos específicos de la carretera y en la función de la carretera, principalmente el apoyo a la operación del tránsito.

Esto ayudó al grupo de trabajo a comprender el efecto del cambio climático en las redes de transporte y a pasar al segundo paso del informe: el análisis de las normas sensibles al clima. El grupo de trabajo ha enumerado cada uno de los documentos utilizados habitualmente por las autoridades de transporte para diseñar, mantener y operar cada tipo de infraestructura: normas, especificaciones técnicas y reglamentos, y ha analizado las circunstancias en las que se utiliza una variable relacionada con el clima. El grupo también tomó en consideración documentos sin variables relacionadas con el clima, que podrían ser impactados por el cambio climático. Este trabajo se ha realizado gracias a bases de datos o a juicios de expertos.

Los documentos fueron finalmente listados y clasificados en tres categorías de prioridad de adaptación, y se compiló una lista de las proyecciones climáticas necesarias para adaptar estos documentos de referencia.

Esta adaptación posterior permite tener más en cuenta los cambios climáticos futuros.

Fuente: CEREMA. Impactos potenciales del cambio climático sobre las infraestructuras y sistemas de transporte, sobre sus estándares de diseño, mantenimiento y operación, y la necesidad de proyecciones climáticas detalladas para su adaptación, 2015. [22]

Al adaptarse al aumento de las temperaturas, se observa que algunos materiales inorgánicos, como el asfalto, el acero, el hormigón y las gravas (incluyendo las arenaas) no están tan expuestos a los riesgos asociados al aumento de las temperaturas como se pensaba anteriormente. En un Proyecto de ampliación de la Autopista Mitchell [35], Main Roads Western Australia evaluó los puentes y el sellado por aspersión y señaló que hay suficiente resiliencia incorporada en las soluciones de diseño estructural tradicionales como para que un aumento de las temperaturas (de hasta 7°C para el año 2100) no tenga un efecto potencial significativamente perjudicial en su suficiencia estructural, las placas de expansión asociadas, los cojinetes o las barandillas de seguridad. Sin embargo, el aumento de la temperatura puede afectar al funcionamiento de los protectores dactilares debido al aumento de la expansión. Se pretende que estos temas se revisen periódicamente a medida que se disponga de más información, para aumentar la resiliencia en el futuro.

El drenaje en carreteras se identifica en muchos casos de estudio como una posible medida de adaptación. Las estructuras de drenaje pueden ser estructuras transversales, como alcantarillas o canales, y también pueden incluir estructuras longitudinales, como las cunetas. El riesgo disminuye si estas obras de drenaje se mantienen en buenas condiciones y libres de escombros u otros materiales, de modo que funcionen eficientemente y alejen el agua de la carretera lo más rápidamente posible sin provocar socavación[36]. Sin embargo, una zona deficiente es aquella en la que las obras de drenaje se bloquean o se cargan por encima de su capacidad. La Administración de Carreteras Públicas de Noruega[37] ha identificado que para asegurar una infraestructura robusta, los diseños de alcantarillas y tuberías deben basarse en un análisis hidrológico detallado. Para mejorar la robustez del drenaje, se proponen las siguientes medidas de adaptación:

- El análisis hidrológico debe incluir el análisis de los escurrimientos naturales y artificiales, y la planificación del sistema de drenaje debe incluir medidas para recoger y controlar el agua en estos.
- Los sistemas de drenaje deben estar diseñados para el volumen/tiempo, la erosión y la abrasión, y el bloqueo de sedimentos, y estos diseños deben permitir la escorrentía durante toda su vida útil con el mínimo mantenimiento necesario.
- Los tubos de alivio pueden utilizarse para aumentar la robustez
- Las medidas para la erosión y el control del transporte de materiales pueden ser construidas en las cuencas de captación aguas arriba de las partes vulnerables del sistema de drenaje[37].

Un ejemplo, donde los sistemas de drenaje han sido bloqueados por los sedimentos que causan daños extensos y deslizamientos menores, se muestra en Noruega (ver Cuadro 15). Del mismo modo, en el recuadro 16 se muestran las medidas de adaptación que se aplican en Dinamarca para adaptar el drenaje de las carreteras a fenómenos como la lluvia.

#### Cuadro 15: Impactos en el sistema de drenaje y sus medidas de adaptación en Noruega

En Odenrun, Noruega, el sistema de drenaje fue bloqueado por los sedimentos y desvió el agua hacia una propiedad privada, la cual no había desarrollado una protección natural contra la erosión. Esto provocó grandes daños y deslizamientos de tierra. Los sedimentos de los deslizamientos y el transporte de agua golpearon las vías del ferrocarril río abajo, tapando el drenaje y causando un colapso del terraplén del ferrocarril. Esto ilustra la importancia de analizar los escurrimientos que el agua puede seguir si se bloquea el drenaje aguas arriba, y la importancia de aumentar las dimensiones y el uso de medidas de control en áreas con erosión y sedimentación (Norwegian Public Road Administration, 2013).



Fuente: Administración Noruega de Carreteras Públicas, 2013. [37]

## Cuadro 16: La carretera de Lyngby, Dinamarca

La carretera de Lungby se cerró en tres ocasiones entre 2010-2011. La autopista de Helsingør en la estación de Ryparken fue construida a desnivel inferior en el terreno circundante para reducir los niveles de ruido y crear espacio para los cruces de caminos. Mientras que el drenaje de la carretera puede hacer frente a la escorrentía de agua de la carretera, los conductos a través de los cuales se bombea el agua también funcionan como un canal de desagüe para el norte de Copenhague. Los problemas surgen cuando los conductos están sobrecargados, por lo que el *Greater Copenhagen Utility*<sup>11</sup> ha implementado una serie de medidas para aumentar la capacidad de estos conductos. El riesgo de inundación se ha reducido, pero esta carretera sigue siendo vulnerable. La Dirección Danesa de Carreteras protege las superficies de las carreteras y los equipos de señalización contra el aumento de la temperatura y los vientos fuertes, como por ejemplo, las superficies de las carreteras, la señalización, las estructuras de señalización, las barreras y las pantallas de reducción del ruido. A modo de medidas de adaptación, se sustituyen los pavimentos desgastados y se evalúan las estructuras de señalización vial en relación con los modelos climáticos pertinentes.

Fuente: Dirección Danesa de Carreteras, 2013. [38]

En relación con el drenaje, se han considerado medidas de adaptación suaves, como la regulación en el cambio en el uso del suelo. En Suecia se llevó a cabo un estudio (Kalantari, 2011) sobre la adaptación de las estructuras de drenaje de las carreteras al clima. El estudio muestra que se pueden aplicar una serie de medidas de adaptación para el drenaje con el fin de hacer frente a las inundaciones más frecuentes. Estas medidas incluyen:

- Aumentar las áreas con alta capacidad de infiltración, por ejemplo, reforestación - esto puede reducir los picos en los escurrimientos y los volúmenes. El aumento de la fricción hidráulica de una cuenca por reforestación puede disminuir la velocidad del flujo aguas arriba y minimizar el flujo máximo de escorrentía aguas abajo. Las mayores tasas de interceptación, evaporación e infiltración debidas al impacto de la reforestación también pueden reducir el volumen de los escurrimientos [39, citado en 13].
- Reducir la intensidad agrícola alrededor de los arroyos con amortiguadores de vegetación - estos incluyen franjas de pasto u otra vegetación entre un área cultivada y un arroyo o una zanja de drenaje. Estas franjas están diseñadas para interceptar las aguas pluviales, reducir el flujo de escorrentía y estabilizar las paredes del arroyo contra los deslizamientos (Minnesota Department of Natural Resources 2011, en[13]). Esta medida puede disminuir la velocidad de las aguas pluviales y reducir el flujo máximo de escorrentía en la parte aguas abajo de la cuenca, y puede ser usada como un método para atrapar sedimentos y otros contaminantes.
- Implementación de césped en los escurrimientos superficiales - para prevenir o controlar la erosión de las cañadas a lo largo de los drenajes y el escurrimiento superficial hacia las alcantarillas. Estos son más eficientes en cuencas pequeñas.

<sup>11</sup> Greater Copenhagen Utility (HOFOR) es la compañía de servicios públicos más grande de Dinamarca, sus áreas de negocio principales son: suministro de agua, gestión de aguas residuales, etc.

También se están considerando otras medidas de adaptación, como la mejora de obras de protección contra la erosión, el aumento de la estabilidad de las paredes finales prefabricadas, la provisión de resiliencia de tuberías y conductos y las evaluaciones hidráulicas. En el cuadro 17 se presenta un ejemplo de reconstrucción de bordos y muros de roca construidos para proteger las carreteras de futuros eventos en Cardwell, Queensland, el cual sufrió graves daños durante el ciclón Yasi en 2011.

#### Cuadro 17: Reconstrucción de la zona costera de Cardwell, Queensland

En Queensland, Australia, la zona costera de Cardwell sufrió graves daños durante el ciclón Yasi en febrero de 2011. Se produjeron graves daños en la autopista Bruce Highway (en el tramo entre Cairns y Townsville) y en la explanada Cardwell. La reconstrucción de la zona costera implicó la reurbanización de una pared de roca para proteger la carretera de futuros eventos, y también proporcionó beneficios turísticos. El proyecto consistió en la reconstrucción de un tramo de dos carriles de 1,4 kilómetros en la autopista Bruce Highway. La reconstrucción de la zona costera de Cardwell se inauguró oficialmente en 2013 y se llevó a cabo en el marco de los Acuerdos Nacionales de Recuperación y Auxilio en Casos de Desastre (NDRRA, por sus siglas en inglés), el Departamento de Transporte y Carreteras Principales, y el Consejo Regional de la Costa de Cassowary.



Daños en la carretera



Antes de la reconstrucción



Después de la reconstrucción

Fuente: Departamento de Transporte y Carreteras Principales, Queensland, Taller Técnico de la PIARC: International Adaptation Strategies and Increasing the Resilience of Infrastructure, Brisbane, mayo de 2017.

Las medidas de adaptación pueden aplicarse también al diseño de nuevas carreteras. El ejemplo de una nueva carretera en la isla de La Reunión, la cual pertenece a Francia, y se localiza en el océano indico próximo a Madagascar, el ejemplo ilustra las soluciones utilizadas para tener en cuenta los cambios del nivel del mar (cuadro 18).

Cuadro 18: Nuevo diseño de la carretera en la isla de La Reunión (Francia):

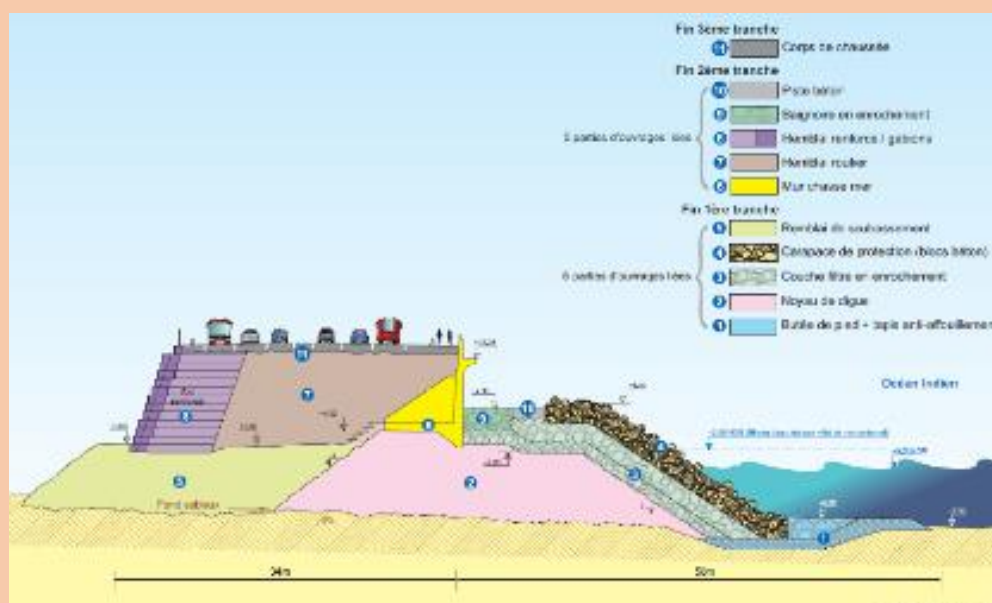
La actual carretera costera es constantemente amenazada por dos peligros: la caída de rocas del acantilado debido a las fuertes lluvias y las marejadas estacionales. La opción elegida para la nueva carretera de tierra es abandonar el trazado actual por un nuevo camino seguro formado por viaductos y diques.

Esta nueva carretera está expuesta a los impactos del cambio climático, como el aumento del nivel del mar (aumento de 1 metro en 100 años) y el aumento del oleaje.

Además, el aumento de la intensidad, la duración y la frecuencia de las precipitaciones en la carretera también dará lugar a mayores niveles de flujo máximo y a mayores riesgos de inundación.

Las medidas adoptadas para hacer frente al cambio climático (nivel del mar y marejada) son las siguientes:

- Geometría y material del dique elegido para asegurar su estabilidad.
- Muro de contención (muro de contención) para evitar la inundación por las olas.
- Estructura de hormigón tetraédrica utilizada en diques de abrigo.
- Revisión del funcionamiento de las alcantarillas en función de la elevación del nivel del mar, y protección contra la erosión con estructuras de hormigón tetraédricas.
- Comprobación del funcionamiento de los puentes en función de la elevación del nivel del mar, protección contra la erosión con revestimiento de roca de hormigón y adaptación de las paredes principales.



*Ejemplo de la sección transversal del dique. ©Eqis*

El dique, el material, el tamaño y las protecciones contra la erosión, así como el muro, están diseñados para hacer frente a las olas, teniendo en cuenta el cambio climático:

- Evaluar la estabilidad del dique en los puntos específicos de la carretera.
- Medir los cruces de agua por encima del muro de contención.
- Medir los niveles alcanzados por los picos de oleaje para calibrar la altimetría de los viaductos.
- Evaluar la protección contra la erosión con una estructura de hormigón tetraédrica en la salida de la alcantarilla.



*Modelo 3D que representa las olas (dique a la izquierda, generador de oleaje a la derecha) - ©Egis*

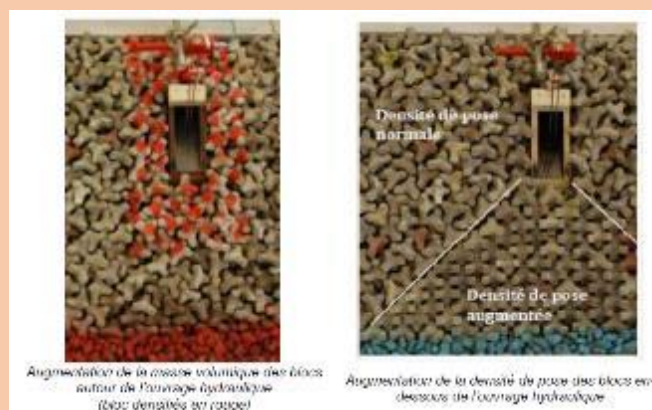
También se llevó a cabo una modelización global del dique para evaluar el comportamiento general del mismo bajo condiciones extremas de estrés, medido e interpretado durante las pruebas en 3D. El comportamiento mecánico de la escollera y del dique se ha modelado numéricamente mediante el software FLAC 3D.



*Eficiencia del dique para la protección de las olas mediante un modelo 3D - ©Egis*

La protección contra la erosión para las salidas de las alcantarillas está hecha de una estructura de hormigón tetraédrica.

La protección contra la erosión retenida se evaluó utilizando un modelo 3D (aumento de la densidad de los bloques alrededor de la alcantarilla y aumento de la densidad de los bloques por debajo de la alcantarilla).



*Nueva ruta en el litoral - Protección contra la erosión en las alcantarillas - ©Egis*

Fuente: EGIS, New Coastal Road, 2016. [40]

### 10.1.2. Medidas de adaptación para la gestión del tránsito y de los riesgos

El objetivo de una infraestructura robusta y confiable es que esta sea capaz de hacer frente tanto a los acontecimientos previstos como a los imprevistos. Las estrategias de adaptación eficaces tienen por objeto garantizar que se produzcan pocos cierres e interrupciones debidas a accidentes, congestionamientos o daños en la infraestructura[41].

Se han aplicado medidas de adaptación como el uso de sistemas inteligentes para el transporte, sistemas de alerta temprana y desvíos de ruta para reducir el impacto de los fenómenos del cambio climático en la comunidad. Desde una perspectiva social, la comunicación sobre los fenómenos meteorológicos es de vital importancia para la preparación y recuperación antes, durante y después de los acontecimientos, y está relacionada con la accesibilidad de los servicios de emergencia. Esto también implica la reducción de las probabilidades de falla en el sistema, así como permitir la redundancia del sistema mediante priorización de opciones alternativas, cambios y sustituciones en situación de estrés, por ejemplo, rutas alternativas. Por lo tanto, esta subsección cubre:

- Sistemas inteligentes para el transporte (ITS, por sus siglas en inglés)
- Sistemas de alerta temprana
- Desvío de ruta (a corto plazo y planificado).

Una comunicación eficaz a través de las soluciones de ITS puede ayudar a garantizar la preparación de la infraestructura. En algunos países, como Corea del Sur, el Reino Unido y Noruega, se utilizan cada vez más grandes cantidades de datos (Big Data) para carreteras inteligentes (Smart roads), sistemas inteligentes y datos inteligentes. Aquí es donde los datos y la información se transfieren en tiempo real directamente a los conductores sobre los accidentes, el estado del tiempo (la información se transfiere directamente a los usuarios) para evitar accidentes o retrasos antes de que ocurran. Las carreteras y puentes inteligentes reúnen datos mediante sensores en tiempo real, lo que proporciona una mayor resiliencia de la infraestructura. Los datos se transfieren utilizando tecnologías de vehículo a vehículo (V2V) y de vehículo a infraestructura (V2I), y existe un uso común de sensores dentro de la infraestructura[3].

Los datos también pueden utilizarse para reducir la interrupción del tránsito y mejorar la seguridad y la fluidez, proporcionando resiliencia a nivel de red. Por lo tanto, la información puede ser transferida más rápidamente a los usuarios del sistema carretero en caso de eventos naturales o provocados por el hombre que perturban su operación, por ejemplo, accidentes de tránsito. Se identificó una amplia gama de ejemplos de casos de estudio sobre el uso de grandes cantidades de datos y comunicación a los usuarios de las carreteras a través de la visita técnica de los integrantes del Foro de Laboratorios Nacionales Europeos de Investigación Carretera (FEHRL, por sus siglas en inglés) en Corea del Sur y Japón[3], en la que se subrayó la necesidad de garantizar que la infraestructura sea resiliente en términos de preparación, robustez, recuperación y adaptación. Ejemplos de ello son el Centro de Información de Tránsito de *Korea Expressway Corporation* y el estudio de radiodifusión. Los datos se recogen en tiempo real, se procesan (a través del Centro Tecnologías de la Información y Comunicaciones) y se difunden al público mediante centros de llamadas, salas de radiodifusión y directamente a los vehículos y conductores (a través de teléfonos móviles o dispositivos inteligentes a bordo en menos de dos minutos) para evitar accidentes o retrasos antes de que se produzcan de forma inmediata y proporcionar una interfaz directa entre los datos y los usuarios de la carretera[3].

El uso de sistemas de alerta temprana y medidas preventivas tienen un papel destacado en Noruega, con un portal web desarrollado a través de la cooperación entre la Administración de Carreteras Públicas de Noruega (NPRA, por sus siglas en inglés), la Dirección de Recursos Hídricos y Energía de Noruega, Bane Nor (la Administración Ferroviaria de Noruega) y el Instituto Meteorológico de Noruega. El portal web [www.xgeo.no](http://www.xgeo.no) ha sido desarrollado para permitir un mejor seguimiento de la operación de las carreteras en caso de eventos climáticos extremos. La herramienta visualiza datos temporales y espaciales sobre el clima y el cambio climático y permite

la preparación, el seguimiento y la predicción de eventos mediante la combinación de datos de los departamentos de meteorología, los departamentos de carreteras y otros organismos relacionados. La información proporciona una buena base para operar la red de carreteras, pero depende de un buen registro de eventos, por ejemplo, el desarrollo de informes electrónicos y aplicaciones de teléfonos inteligentes para el registro de eventos[42]. Esto se describe con más detalle en el Marco de la PIARC [4] y el Cuadro 4c.

El portal web [www.xgeo.no](http://www.xgeo.no) también constituye la base de un sistema de alerta común para inundaciones y deslizamientos de tierra, mediante el portal [www.varsom.no](http://www.varsom.no), donde se emiten alertas sobre inundaciones, avalanchas de nieve y deslizamientos de escombros para los operadores de carreteras, los usuarios de las mismas y el público en general. El servicio nacional de alerta de avalanchas fue lanzado en enero de 2013 por el Centro Noruego de Alerta de Avalanchas, que produjo boletines sobre avalanchas (según las normas europeas como parte de los Servicios Europeos de Alerta de Avalanchas ([www.avalanches.org](http://www.avalanches.org))). El objetivo principal de estos servicios de alerta temprana es evitar accidentes y reducir los problemas debidos a avalanchas. El servicio contiene información sobre el grupo de previsión, un cuerpo de observadores profesionales, sistemas de información y comunicación, modelos de nieve y meteorológicos, así como estaciones hidrometeorológicas automáticas [37].

## Cuadro 19: Servicios de alerta de avalanchas, Noruega

El Centro Noruego de Alerta de Avalanchas y el portal “[www.varsom.no](http://www.varsom.no)” se inauguraron en enero de 2013. El centro virtual es una colaboración entre la Dirección de Recursos Hídricos y Energía de Noruega (NVE), Bane Nor (Administración Noruega de Ferrocarriles), el Instituto Meteorológico Noruego (MET) y la Administración Noruega de Carreteras Públicas (NPRA). El centro ofrece actualizaciones continuas sobre la situación actual y la evolución futura del riesgo de inundaciones, avalanchas y aluviones, a las partes interesadas nacionales y regionales, y al público en general. La NVE es responsable del servicio.

El sitio web [www.varsom.no](http://www.varsom.no) emite pronósticos y advertencias para varios tipos de riesgos geológicos. Cada geoamenaza tiene su propio entorno para su pronóstico y puntos de contacto. El centro publica boletines en el portal al menos dos veces al día y durante los tres días siguientes. Las alertas de aluviones se emiten durante todo el año, mientras que las alertas de avalanchas de nieve se emiten sólo en la “temporada de avalanchas” definida, que es del 1 de diciembre al 31 de mayo. Los boletines sobre avalanchas del Centro se producen de acuerdo con las normas europeas como parte de los Servicios Europeos de Alerta de Avalanchas ([www.avalanches.org](http://www.avalanches.org)). Las alertas de inundación y de aluviones siguen una escala de cuatro niveles, a veces presentada de manera popular, con la ayuda de botas de goma.



Los principales usuarios se encuentran dentro del grupo de los deportes de invierno recreativos, las autoridades de carreteras y ferrocarriles, y las autoridades de emergencia. El boletín y los pronósticos son herramientas importantes para evaluar las condiciones de la avalancha de nieve, pero no proporcionan la respuesta correcta para cada pendiente cubierta de nieve. Por lo tanto, el boletín y los pronósticos están concebidos para ser lo más educativos posible; con un servicio de información y educación sobre avalanchas, la concientización sobre las avalanchas aumentará y permitirá al público evitar accidentes. Por ejemplo, los problemas de avalanchas se describen a través de situaciones típicas que ocurren en los terrenos susceptibles a avalanchas.

Fuente: Administración Noruega de Carreteras Públicas, 2013. [37]

La comunicación de la información a los usuarios de la carretera es, por lo tanto, de gran importancia para garantizar la reducción de los costos de los usuarios de la carretera y de los costos socioeconómicos. Cuando una carretera se cierra debido a una inundación, la Dirección de Carreteras de Dinamarca, en cooperación con la policía, los servicios de emergencia y las

autoridades, gestionan la situación para optimizar los objetivos de los usuarios de la carretera en relación con el estado de la misma.

Esto se logra a través de:

- Servicios de llamada listos para cerrar la carretera y garantizar la seguridad de los usuarios de la misma
- Informar a los usuarios de la carretera sobre la inundación, por ejemplo, servicios de información sobre el tránsito, tales como el sitio web [www.vejdirektoratet.dk](http://www.vejdirektoratet.dk), aplicaciones de telefonía móvil, GPS y actualizaciones del tránsito en la radio
- Atención rápida, por ejemplo, bombas de emergencia en zonas de inundación
- Mejorar el flujo de tránsito en las carreteras pertinentes utilizando rutas para el desvío (Dirección Danesa de Carreteras, 2013).

También se han desarrollado otras respuestas innovadoras para mejorar la señalización y la comunicación en caso de inundaciones, utilizando materiales reciclados para la infraestructura de señalización. Esto se ha identificado en Logan City Council, en Queensland, Australia.

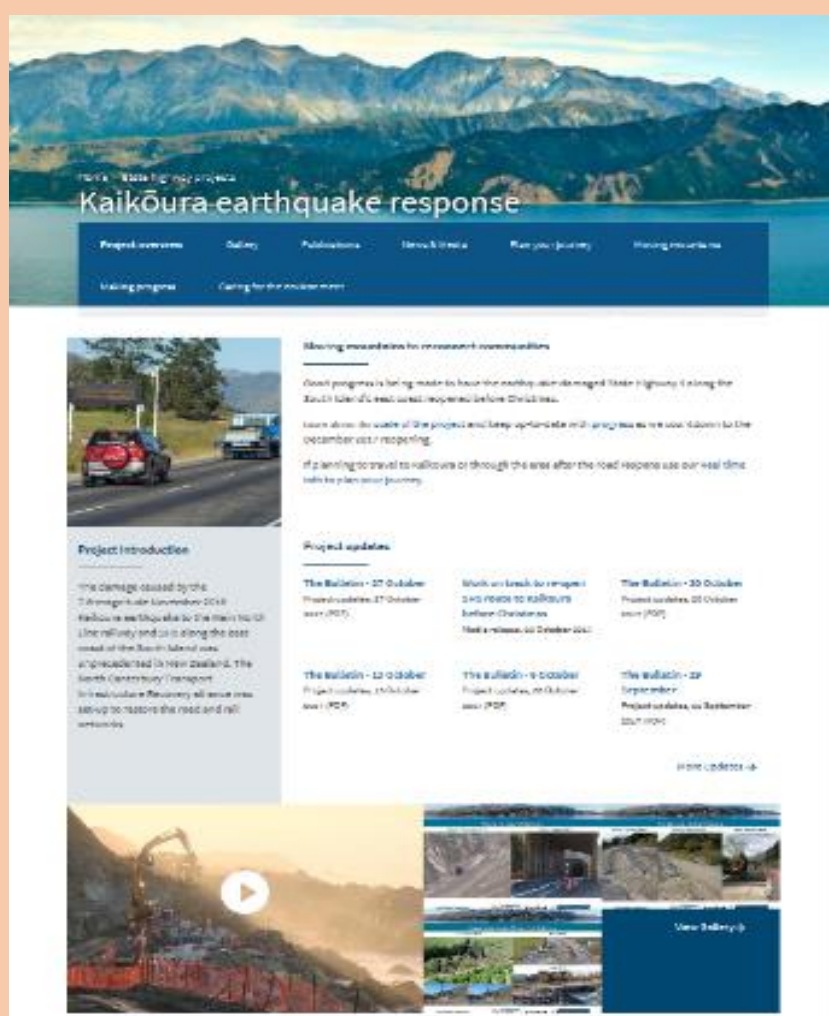
La comunicación con los usuarios de la carretera también puede ser utilizando las actualizaciones de Internet sobre la reconstrucción de carreteras después de eventos significativos derivados del cambio climático. Si bien la cobertura de los terremotos queda fuera del alcance del Plan Estratégico asignado al CT E.1, el Cuadro 20 ofrece un ejemplo de cómo puede proporcionarse información a los usuarios de las carreteras de Nueva Zelanda.

### Cuadro 20: Sitio web de información pública sobre el terremoto de Kaikoura, Nueva Zelanda

Los daños causados por el terremoto de 7,8 grados de magnitud en Kaikoura al ferrocarril *Main North Line* y a la SH1 a lo largo de la costa este de la Isla del Sur fueron sin precedentes en Nueva Zelanda. La alianza *North Canterbury Transport Infrastructure Recovery* (NCTIR, por su siglas en inglés, que significa alianza para la recuperación de la infraestructura de transporte en Canterbury del Norte) fue establecida para restaurar las redes de carreteras y ferrocarriles.

El modelo de aprovisionamiento es conseguir que las cosas se hagan lo más rápido posible. El trabajo de NCTIR incluye la reparación y reconstrucción de las redes de transporte para que sean más resilientes y seguras, ayudando a mantener a todos mejor conectados en el futuro. La reconstrucción es una tarea de gran envergadura, e incluso después de que se restablezca el acceso, habrá un programa de reparaciones en curso para mejorar y ayudar a mantener la resiliencia de la red.

Para ello se proporciona información al público sobre la reapertura de las actualizaciones a través del sitio web, tal y como se ilustra a continuación.



Fuente: Agencia de Transporte de Nueva Zelanda ([www.nzta.govt.nz](http://www.nzta.govt.nz))

La red de carreteras es un componente fundamental para el funcionamiento eficaz de la economía. Una red crítica tiene el potencial de presentar una grave pérdida en la riqueza económica de una nación (Agencia de Carreteras, 2011). Esto se destaca en un caso de estudio para la Highways Agency (ahora llamada Highways England) en el Cuadro 21.

Cuadro 21: La interrupción carretera debido a las inundaciones en el año 2007 (Highways Agency, Reino Unido)

Inundaciones sin precedentes en todo el país causaron inundaciones generalizadas en julio de 2007, lo que provocó trastornos en los viajes de muchos conductores. Los cierres afectaron a la red de autopistas (M1, M4, M5, M18, M25, M40, M50 y M54) y muchas carreteras locales y troncales también se vieron afectadas. Los costos de reparación de todas las carreteras (incluidas las carreteras que no son de la agencia de carreteras del Reino Unido) se estimaron en 40-60 millones de libras. Las inundaciones de un solo día (20 de julio) causaron el 2% de los retrasos de todo el año. La inundación de lo que era una pequeña parte de la red de carreteras dejó a casi 10,000 personas a la deriva. Las autopistas M5 y M50, que se cerraron en ambas direcciones, fueron las más afectadas. Los agentes de tránsito hicieron dar vuelta a los conductores en la dirección opuesta, y desviaron a los conductores a los servicios de Strensham, donde les proporcionaron alimentos y agua de emergencia. La Agencia de Carreteras emitió consejos de viaje a los conductores a través de los medios de comunicación y sitios web antes de la previsión de lluvias y las 24 horas del día, los 7 días de la semana, durante las inundaciones. Los oficiales de tránsito y contratistas de la Agencia de Carreteras también proporcionaron ayuda para las operaciones de prevención de inundaciones más allá de la red estratégica de carreteras. Esto incluyó el transporte del personal de los servicios de emergencia, la implementación de cierres y desvíos de carreteras locales y el suministro de sacos de arena.



*El oficial de tránsito se ve ayudando a despejar el tránsito en la M5.*

Fuente: Agencia de Carreteras. [43]

El cambio de ruta de las redes de mercancías y pasajeros (a corto plazo y previstas) y el aumento de la resiliencia de un sistema de transporte se presentan como una medida de adaptación beneficiosa.

Si bien la redirección del tránsito beneficia a los usuarios de la carretera al mejorar el tiempo de viaje, reducir los costos de operación de los vehículos y reducir los costos de los retrasos en el transporte de mercancías, el desvío para el mantenimiento de las carreteras puede tener un aspecto económico más amplio. Esto se debe a la naturaleza de la carga de los vehículos en las carreteras. Los vehículos pesados causan más estrés en las carreteras que los vehículos ligeros y, en particular, cuando los pavimentos de las carreteras están mojados, pueden causar la mayor parte de los daños, ya que el pavimento se encuentra saturado y debilitado. En 2008/2009 muchas carreteras de Queensland fueron limitadas al 80% de su capacidad de transporte para evitar daños en el largo plazo[36; 44].

También se reconoce que otras medidas de adaptación pueden incluir a las comunidades. Por ejemplo, el aumento de la autosuficiencia de la comunidad es una medida de adaptación en virtud de la cual algunas poblaciones han experimentado eventos relacionados con inundaciones o tormentas con frecuencia. Como medidas de adaptación, las personas en las comunidades pueden asegurarse de que tienen suficientes recursos alimenticios, en preparación para la inaccesibilidad a los centros comerciales. Alternativamente, también se han mostrado ejemplos en los que se han hecho arreglos con otros habitantes locales para llevar a los niños en coche a lugares cercanos para que asistan a la escuela.

### 10.1.3. Medidas de adaptación en el mantenimiento

Las amenazas del clima a menudo se identifican, analizan y reducen continuamente, como parte integral del mantenimiento, la nueva construcción y la rehabilitación de carreteras[41]. El cambio climático pone de manifiesto la necesidad de llevar a cabo un mantenimiento eficaz y de reducir los retrasos en la conservación carretera. Se recomienda que todas las operaciones programadas de mantenimiento y reparación incluyan medidas de adaptación siempre que sea necesario, a fin de garantizar una capacidad suficiente durante el resto de la vida útil del activo [42]. Esto incluye la consideración de formas rentables para reducir los costos del ciclo de vida de los activos a lo largo de su vida útil.

Las opciones de adaptación también se pueden identificar para diferentes niveles (robustez total/protección total u opciones de mantenimiento preventivo). Por ejemplo, cuando una carretera está diseñada para ser significativamente inmune a los efectos de los principales eventos climáticos, esto puede implicar elevar la altura de la subrasante en áreas vulnerables, aumentar el drenaje del subsuelo, ensanchar los hombros, importar materiales granulares de alta calidad (modificados con asfalto o cemento), o rehabilitar y volver a sellar la carretera a intervalos regulares. Se reconoce que estas opciones de resiliencia total pueden implicar un amplio trabajo de rehabilitación necesario para que un tramo carretero dado sea totalmente resiliente, esté protegido y a menudo será costoso. Además, este enfoque puede no ser adecuado para carreteras con poco tránsito, en las que los elevados costos de la organización de carreteras pueden no estar suficientemente compensados por la reducción de los costos de los usuarios de las carreteras. A la inversa, se pueden considerar otros enfoques de resiliencia, tales como trabajos mayores, periódicos o de mantenimiento en la carretera, dirigidos tanto a los tramos de valor estratégico, como a las secciones con una alta vulnerabilidad. Esta opción requiere un mayor gasto en rehabilitación programada y puntos más bajos (basados en la condición física o en la edad del activo) para los trabajos de remediación. Este enfoque tiene por objeto aumentar la resiliencia de la red a los efectos inmediatos, por ejemplo, la precipitación, de modo que el programa de reparación después de los eventos sea solo una fracción de la magnitud actual. En este escenario se reconoce que, si bien los grandes acontecimientos pueden provocar cierres y retrasos en las carreteras, los daños se reducirán considerablemente para permitir la reapertura de los tramos en casos de emergencia rápida[36]. En la sección 11.1.5 se ofrece un análisis más detallado de estos enfoques como ejemplo de las metodologías de cálculo del costo del ciclo de vida utilizadas para dar prioridad a las medidas de adaptación.

Además, los contratos de operación (firmados sobre una base de 5-7 años) necesitan tomar en consideración las tendencias observadas y la incertidumbre del clima, tales como combinaciones climáticas inusuales, más vegetación a lo largo de la carretera, temperaturas alrededor del punto de congelación, nieve a la deriva, etc. Los contratos deben formularse de manera flexible para tener en cuenta el elemento imprevisible[42].

### 10.1.4. Medidas de adaptación operativas, organizativas y de planificación

Las medidas de adaptación operativas, organizativas y de planificación implican la integración del cambio climático en la plataforma:

- fase de diseño;
- reglamentos técnicos, posibles cambios en los reglamentos y normas existentes para dar cabida a un aumento de la resiliencia para hacer frente a los fenómenos del cambio climático; y
- marcos jurídicos.

La importancia de integrar las medidas de adaptación en la fase de planificación y diseño de la construcción de carreteras para prevenir los daños debidos al cambio climático está siendo considerada internacionalmente. El objetivo es evitar una vulnerabilidad excesiva mediante una planificación y un diseño adecuados, en los que se tenga en cuenta el clima en todos los procesos de planificación y tan pronto como sea posible al desarrollar el proyecto. Entre estos ejemplos cabe citar los siguientes

- Introducción de las condiciones climáticas entre los supuestos para el diseño de las carreteras.
- La alineación horizontal de la carretera debe elegirse de tal manera que el riesgo de inundaciones, deslizamientos de tierra, nieve a la deriva e impactos climáticos similares se reduzca o sea más fácil de manejar.
- La alineación vertical debe elegirse con respecto a un nivel de inundación conservador (por ejemplo, una inundación de 200 años en lugar de un período de retorno de 100 años). Esto incluye el diseño de puentes, en cuanto a altura libre y protección contra la erosión.
- Las medidas de protección contra los deslizamientos deben planificarse teniendo en cuenta los efectos del cambio climático, por ejemplo, flujos de escombros (aluviones) y las avalanchas de nieve.
- Gestión de las aguas de escorrentía y elaboración de planes separados para la gestión de las aguas pluviales.
- Deben planificarse soluciones integrales de drenaje en un área extensa, que se extienda desde la carretera, por ejemplo, incrementando el uso de cuencas de retención y zanjas en el terreno. Esto está siendo investigado más a fondo por el programa NIFS, Noruega[42].

Por ejemplo, Egis[26] señala en un estudio sobre la mejora del diseño y la construcción de la carretera de acceso de Pasakha, en Bhután, donde se pueden aplicar medidas de adaptación para los pavimentos de las carreteras, los puentes y las alcantarillas, las fallas de los taludes y los deslizamientos de tierra. El diseño de las estructuras de drenaje se ha basado en el diseño previsto en el futuro para garantizar que los pavimentos de las carreteras no se inunden, esto implica sistemas de drenaje más grandes, como son aquellos con mayor capacidad de descarga, en lugar de los drenajes de forma común. Se pueden considerar otras medidas de adaptación de la infraestructura, tanto en la pavimentación de carreteras, como en puentes y alcantarillas, así como en posibles fallas en los taludes y deslizamientos de tierra. Esto se detalla en el Cuadro 22.

Cuadro 22: Medidas de adaptación utilizadas en la mejora de la carretera de acceso de Pasakha.  
Proyecto de conectividad vial de SASEC.

- Pavimento de carretera:

El diseño de las estructuras de drenaje se ha basado en las descargas de diseño futuras previstas para que los pavimentos de las carreteras no se inunden, ni se interrumpa la circulación por los escurrimientos. Este enfoque condujo a sistemas de drenaje más grandes, con mayor capacidad de descarga en lugar de los drenajes de forma común. Egis también aconsejó al Departamento de Carreteras de Bhután que aumentara la calidad de la construcción mediante el control de la misma durante la construcción, y adoptara una resistencia del concreto mas grande. Después de la construcción, el gobierno local tendrá que proporcionar recursos suficientes para el mantenimiento, por ejemplo, para asegurar el buen funcionamiento del drenaje subterráneo, para mantener seca la capa de construcción y garantizar su durabilidad.

- Puente y alcantarillas:

Considerando el flujo de diseño estimado en el futuro, se han aplicado suficientes estructuras de formación fluvial, muros de ala, estribos y estructuras de protección contra la erosión para puentes y alcantarillas tanto aguas arriba como aguas abajo de las construcciones. Del mismo modo, se ha aumentado la capacidad de drenaje de los puentes y alcantarillas, al tiempo que se diseñan más amplios y más altos, y se han propuesto alcantarillas auxiliares en función de las necesidades del emplazamiento. Además de estas medidas, Egis informó al gobierno de Bután sobre otras recomendaciones para mejorar el diseño de infraestructuras en esa región. La aplicación de suficientes factores de seguridad en el diseño de puentes y alcantarillas es una buena manera de asegurar la construcción. Además, en esta zona inestable, evitar zonas peligrosas como tramos propensos a inundaciones y deslizamientos de tierra, siempre que sea posible, es vital para la durabilidad de las carreteras.

Egis insistió en monitorear y limpiar regularmente el sistema de drenaje y los escurrimientos de agua para asegurar flujo sin turbiedad hacia las alcantarillas y debajo de los puentes.

- Fallo de taludes y deslizamientos:

Para estabilizar las zonas de fuertes pendientes, las técnicas de bioingeniería se han extendido al máximo. Consisten en la plantación de especies vegetales y gramíneas locales, especialmente en las zonas de estabilización para evitar la reactivación de los deslizamientos.

Se han sugerido otras recomendaciones en el diseño, como la reducción de pendientes cerca de la carretera para aproximarse a su estabilidad natural o la construcción de presas de contención o muros de contención para confortar las inestables pendientes y proteger la carretera. Además, el aumento de la investigación de suelos y materiales permitirá identificar áreas inestables y medidas de mitigación antes de la fase de construcción.

Fuente: Egis, Improvement of Pasakha Access Road - SASEC Road Connectivity Project - Bhután, 2016. [26]

Sin embargo, se reconoce que en el desarrollo de nuevos activos, la mayoría de las respuestas de adaptación pueden formar parte de la construcción de una fase actual de diseño; sin embargo, a veces hay margen para desarrollar una vía de adaptación que considere cómo se puede mejorar el

activo para hacer frente al riesgo del cambio climático en el futuro, y a medida que se disponga de nuevos datos. La gestión de un activo existente también puede visualizar las respuestas de adaptación implementadas ahora, con una secuencia de otras programadas en el futuro como respuestas a desencadenantes o umbrales clave y puntos de decisión futuros[45]. Además, se observa que la adaptación de determinados activos puede aumentar o reducir la adaptabilidad de otros activos[33].

También es importante determinar cuándo es apropiada la reconstrucción de la infraestructura (y la inclusión de medidas de adaptación al cambio climático en la fase de diseño) y si se deben incluir los beneficios colaterales en las medidas de adaptación que también ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En algunos estudios que, a pesar de la atractiva idea de adaptarse al cambio, es más probable que las adaptaciones en el sector del transporte se produzcan cuando la infraestructura llegue al final de su vida útil y sea necesario reconstruirla (Taylor & Philip 2011, citado en[46]). Además, el rediseño de las medidas de adaptación puede tener lugar después de acontecimientos frecuentes y de la necesidad reconocida de aumentar la resiliencia de la infraestructura. Un ejemplo es el puente Houghton Highway Bridge en Queensland, que es un puente a prueba del cambio climático que resistirá las olas generadas por una tormenta severa de 1 evento en 2000 años. La construcción de este nuevo puente se llevó a cabo junto al puente viejo y proporcionó beneficios inmediatos adicionales a los usuarios, como la reducción de los retrasos en el tránsito, incluye senderos para peatones y ciclistas que conectan con las redes de bicicletas existentes, y busca mejorar la seguridad de los navegantes en términos de despeje de la navegación, al mismo tiempo que se mantienen las características ambientales y culturales de la zona[44]. Por lo tanto, para permitir la adaptación se requiere un análisis complejo y basado en el lugar de los patrones de impacto y las tendencias climáticas.

La incorporación de la adaptación en la organización es fundamental para formular soluciones de gestión y mitigación apropiadas para eliminar o reducir los riesgos climáticos. Esto influye directamente en el éxito de la futura operación, mantenimiento y mejora de la red estratégica de carreteras (SRN)[47]. Además incluye la consideración de las normas existentes, y las modificaciones de las normas, las cuales son una importante medida de adaptación de la organización. La Agencia de Carreteras de Inglaterra (Highways England antes Highways Agency) reconoce que las redes han experimentado problemas significativos debido a las precipitaciones y las temperaturas extremas, y que es probable que estos sucesos aumenten en frecuencia y severidad con el tiempo a medida que los impactos del cambio climático aumentan con el tiempo. La mayor parte de la red es susceptible a los fenómenos meteorológicos y a los cambios en la integridad de los activos y, como tal, afecta negativamente a la fiabilidad y la seguridad del viaje. Con el fin de tratar estos riesgos, se proponen cambios en las normas técnicas para aumentar la resiliencia al cambio climático. Estos incluyen el estándar de drenaje HD33 y la especificación revisada de un pavimento con módulo elevado (Enrobé à Module Élevé, cuyas siglas son EME2)[47].

Además, se han desarrollado herramientas para incorporar las consideraciones sobre el cambio climático en normas específicas. Un ejemplo es el diseño de una herramienta de calificación de la sustentabilidad de la infraestructura de Australia Occidental desarrollada por el Departamento de Carreteras Principales de Australia Occidental (MRWA, por sus siglas en inglés), que evalúa las iniciativas de sustentabilidad y los posibles impactos ambientales, sociales y económicos de los proyectos de infraestructura, incluido el cambio climático (evaluación del riesgo del cambio climático y medidas de adaptación), e incorpora estas consideraciones en las normas. Esta

herramienta se está desarrollando en toda la industria. Dos elementos de la herramienta se relacionan con el cambio climático (evaluación de los riesgos del cambio climático y medidas de adaptación). Además, MRWA ha desarrollado planes para el desarrollo de una respuesta apropiada para adaptarse al cambio climático y asegurar que las comunidades sean adaptables. MRWA está incorporando consideraciones sobre el cambio climático en normas específicas, por ejemplo, el aumento del nivel del mar se considera para proyectos costeros (Bettini, L. Main Roads Western Australia, Taller Técnico de la PIARC, mayo de 2017). Otros ejemplos de iniciativas operativas y organizativas para mejorar las estrategias de gestión de la red y mejorar la resiliencia de su infraestructura es mediante la mejora de las normas, las cuales se esbozan en los cuadros 23 y 24, el Departamento de Transporte y Carreteras Principales (TMR) de Queensland, y el Consejo de la Ciudad de Logan, Queensland, Australia.

**Cuadro 23: Aumento de la resiliencia de la infraestructura, Departamento de Transporte y Carreteras Principales, Queensland**

Los principales retos a los que se enfrenta el Departamento de Transporte y Carreteras Principales de Queensland son los fenómenos meteorológicos extremos, que causaron daños por un valor de 6.000 millones de dólares en las carreteras que son propiedad estatal entre 2010 y 2013, lo que ofrece importantes oportunidades para aumentar la capacidad de recuperación de la red. Por lo tanto, TMR ha desarrollado numerosas iniciativas operativas y organizativas para mejorar la resiliencia de su infraestructura, incluyendo:

- Las directrices de diseño actualizadas proporcionaron criterios de ingeniería y orientación para la planificación, el diseño y la ejecución del trabajo en el marco de los Acuerdos de Recuperación y Auxilio en Casos de Desastres Naturales (NDRRA, por sus siglas en inglés) de la Comunidad de países a los que pertenece Australia.
- Infraestructura reconstruida según los estándares de ingeniería actuales, incluyendo la elevación de secciones de la carretera para permitir la continuación del flujo de tránsito durante los eventos de inundación. Este diseño resiliente a las inundaciones se utilizó en un lado de la autopista Bruce Highway, al sur de Rockhampton. Durante las inundaciones, ambas direcciones del tránsito compartirán la sección elevada de la carretera.
- Tratamientos como la estabilización con asfalto espumado para devolver los activos a estándares equivalentes pero más resilientes
- Financiamiento complementario para mejorar la resiliencia, tales como el ensanchamiento, el sellado de acotamiento y las reparaciones geotécnicas.

La respuesta de TMR a la mejora de la resiliencia implica planificar y responder, proporcionando resiliencia del pavimento a través de la adopción de un enfoque del ciclo de vida. Se identificó que las directrices del Programa de Reconstrucción de la Red de Transporte (PNRT, por sus siglas en inglés) abordan la mejora de la resiliencia de las carreteras, enfatizan la importancia de abordar las causas contribuyentes y reconocen que las compensaciones son necesarias.

Fuente: Departamento de Transporte y Carreteras Principales, Queensland, Taller Técnico Internacional de la PIARC sobre Estrategias de Adaptación y Aumento de la Resiliencia de la Infraestructura, Brisbane, mayo de 2017.

**Cuadro 24: Estrategias del ciclo de vida de los activos para una vida útil óptima y una mayor inmunidad a las inundaciones en las carreteras vulnerables de Logan, Queensland**

Hay dos ríos principales en la ciudad de Logan, con 54 arroyos de alimentación y 30 arroyos rurales. Recientemente han ocurrido eventos climáticos severos que han afectado los caudales a lo largo de estos dos ríos principales. En 2017, el río Albert tuvo un evento de 1 en 100 años. Además, en 2017, el Río Logan tuvo un evento de 1 en 20-50 años. Estos eventos inundaron 185 casas y provocaron la necesidad de cerrar 103 carreteras. Inundaciones como ésta han ocurrido regularmente desde 2011 (específicamente en 2011, 2012, 2013 y 2015).

Debido a estas inundaciones regulares, la ciudad de Logan desarrolló dos clasificaciones de resiliencia de la red:

- Carreteras inundadas y daños inmediatos, donde es necesario cerrar las carreteras debido a la presencia de agua en la superficie; este período de cierre puede variar de días a semanas. Esto se deriva del análisis de riesgo de las carreteras inundadas realizado en 2011.
- Las carreteras afectadas debido a un período de lluvia prolongado se refieren a cuando el pavimento está saturado por un período de tiempo prolongado, probablemente causado por instalaciones de drenaje bloqueadas o ineficientes.

Estas estrategias de gestión de redes deben adaptarse tanto al ciclo del fenómeno de “El Niño” como al de “La Niña”. El Consejo tiene por objeto equilibrar las tasas de deterioro interviniendo a través de una gestión flexible y prudente de la resiliencia de la red de carreteras. Para manejar los impactos potenciales a través de los ciclos de “La Niña”, el Consejo interviene e invierte en la resiliencia de la red durante los ciclos eutrales de “El Niño”, y evalúa/revisa la estrategia después de un ciclo de “La Niña”.

Actualmente se está llevando a cabo un proyecto para elaborar mapas de las características del suelo en el marco de la infraestructura crítica. Esto incluye la reactividad, corrosividad, cambio de volumen, etc. Estos datos se recopilarán a partir de los datos geotécnicos del pavimento del ayuntamiento, de los datos de la Organización de Investigación Científica e Industrial (CSIRO, por sus siglas en inglés) y de los datos de los socios de la Alianza (para la Gestión de Activos Hídricos). Este proyecto ayudará a orientar las decisiones futuras en materia de infraestructuras para minimizar los retos a los que se enfrenta actualmente el Ayuntamiento de Logan.

Otras iniciativas que el consejo está llevando a cabo incluyen:

- Levantamientos periódicos para determinar la vida útil de la superficie de la carretera y cualquier defecto o daño presente;
- Monitorear el desempeño de la red de carreteras para determinar la vida útil tanto de la superficie de la carretera como del pavimento;
- Uso de sistemas automatizados de alerta de inundaciones;
- Análisis de infraestructuras críticas para la gestión de las planicies de inundación; y
- Utilización de sistemas de comunicación de inundaciones y desastres.

El Ayuntamiento de Logan utiliza tecnologías inteligentes para gestionar el impacto de las inundaciones. Se reconoce que es necesario disponer de estrategias flexibles de gestión de carreteras para atender los riesgos de un clima variable, incluida la identificación de zonas propensas a inundaciones, la identificación de rutas estratégicas críticas y la gestión de las redes.

Fuente: Logan City Council, Queensland Australia, Taller Técnico Internacional de la PIARC sobre Estrategias de Adaptación y Aumento de la Resiliencia de la Infraestructura, Brisbane, mayo de 2017.

En Nueva Zelanda se han identificado otros enfoques para integrar las medidas de adaptación al cambio climático en las organizaciones a través de la Guía de evaluación de los efectos costeros de Nueva Zelanda desarrollada por la Agencia de Transporte de Nueva Zelanda. Esta guía responde a la atención prestada por la Agencia a los efectos a largo plazo del cambio climático, como el aumento del nivel del mar, el aumento de las inundaciones y diversos efectos ambientales para garantizar la resiliencia de la red de carreteras de Nueva Zelandia (véase el cuadro 25 para más detalles).

La Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos de América (FHWA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos ha elaborado directrices técnicas y métodos para incorporar la elevación del nivel del mar y la precipitación futura de las autopistas en entornos costeros y fluviales. Cada una de las directrices ofrece una gama de enfoques analíticos en función de la criticidad y la vida útil esperada de una instalación. Estos Lineamientos incluyen:

- Circular de Ingeniería Hidráulica 25 Vol 2, Carreteras en el Medio Costero: Evaluación de eventos extremos:

<https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/nhi14006/nhi14006.pdf>

- Circular 17 de Ingeniería Hidráulica, Carreteras en el Entorno Fluvial - Planicies de inundación, Eventos Extremos, Riesgo y Resiliencia, 2ª Edición:

<https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif16018.pdf>

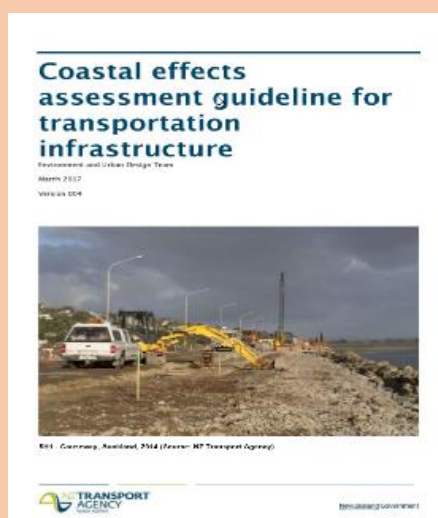
Varias agencias de transporte en los Estados Unidos han incorporado la adaptación en sus propios procesos programáticos. El Departamento de Transporte del Estado de Washington (DOT) tiene documentos para guiar sobre la consideración de los impactos del cambio climático en la revisión ambiental y la planificación del transporte. Ambas directrices ordenan a los planificadores de proyectos que se refieran a los resultados de una evaluación de vulnerabilidad a los impactos climáticos que la agencia llevó a cabo en 2010. Las directrices ambientales proporcionan además un proceso analítico para evaluar los impactos del cambio climático en los proyectos propuestos y en el medio ambiente afectado circundante. La Administración de Carreteras del Estado de Maryland evalúa los impactos del aumento del nivel del mar como parte de su proyecto de revisión ambiental en los condados costeros. Por ejemplo, el formulario de autorización ambiental del estado para proyectos menores de obras viales financiados por el gobierno federal pregunta si el trabajo se llevará a cabo en un área potencialmente impactada por el cambio en el nivel del mar, basado en mapas del nivel medio del mar y del nivel medio más alto del agua en los años 2050 y 2100. En caso afirmativo, señala que el proyecto debe tener en cuenta el cambio del nivel del mar. El Departamento de Transporte del Estado de Nueva York (DOT) incluye cambios en la precipitación y en el nivel del mar en sus normas de diseño para puentes. Las directrices exigen que los puentes nuevos y de reemplazo aumenten los flujos máximos actuales en un 10 ó 20 por ciento, dependiendo del condado, para tener en cuenta los flujos futuros proyectados. En las directrices también se pide que los puentes costeros nuevos y de reemplazo consideren criterios de diseño que incorporen proyecciones de elevación del nivel del mar. Los diseñadores deberán considerar la elevación del nivel del mar e incluir la proyección el estado medio de las proyecciones. Para los puentes críticos, los diseñadores deberán considerar la elevación del nivel del mar e incluir la proyección de la elevación del nivel del mar y los flujos actuales de Q500. El Departamento de

Transporte de California también tiene una guía sobre la incorporación del aumento del nivel del mar en la planificación y el desarrollo de proyectos<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> [http://www.dot.ca.gov/ser/downloads/sealevel/guide\\_incorp\\_slr.pdf](http://www.dot.ca.gov/ser/downloads/sealevel/guide_incorp_slr.pdf)

Cuadro 25: La Agencia de Transporte de Nueva Zelanda, Guía de Evaluación de los Efectos Costeros, 2017



La Agencia de Transporte de Nueva Zelanda ha elaborado la *guía para la evaluación de los efectos costeros* en respuesta a la atención prestada por la Agencia a los efectos a largo plazo del cambio climático, como el aumento del nivel del mar, el aumento de las inundaciones y diversos efectos ambientales para garantizar la resistencia de la red de carreteras de Nueva Zelanda.

Establece un Marco de gestión de riesgos que proporcionaría un proceso para la toma de decisiones coherentes sobre los activos costeros. Más recientemente, todo el proceso de evaluación del riesgo costero para los proyectos de Kaikoura han utilizado la guía. La guía proporciona un rastro auditable y pueden demostrar una buena gestión del riesgo y una responsabilidad de cooperación (y gubernamental).

Se ha utilizado para una serie de otros proyectos, así como para muchos científicos costeros y profesionales de la ingeniería.

La guía fue desarrollada para los equipos de proyecto que participan en las etapas de aprobación y autorización del proyecto, así como en el diseño, construcción y gestión de los activos costeros:

Identificar los efectos ambientales que pueden influir en el mantenimiento, la renovación, la nueva urbanización o la gestión de los activos en el entorno costero a lo largo de la vida útil del activo.

Llevar a cabo una evaluación cualitativa del riesgo de los efectos ambientales identificados mediante la presente guía.

Desarrollar medidas para atender los impactos en los activos carreteros de la Agencia de Transporte y sobre el entorno ambiental en los ecosistemas costeros.

El proceso de evaluación de riesgos descrito en esta guía resume y documenta las amenazas clave para los activos y los entornos costeros, permitiendo a los equipos de proyecto desarrollar soluciones de mitigación y gestión adecuadas. Establece un proceso de gestión de riesgos para identificar soluciones para su manejo de forma coherente y registrar el análisis.

En general, la guía describe un enfoque de evaluación del riesgo ambiental costero destinado a informar la planificación, el diseño y la gestión de los activos de las carreteras estatales en los entornos costeros. En él se esbozan las cuestiones clave que deben considerarse en torno a los riesgos para los activos y sus efectos en la dinámica costera cambiante, como el aumento del nivel del mar y el aumento de los efectos de las mareas o las tormentas.

Fuente: Agencia de Transporte de Nueva Zelanda, 2017 ([www.nzta.govt.nz](http://www.nzta.govt.nz)).

El Marco de la PIARC (2015) también propone una serie de opciones no técnicas. Estos incluyen:

- Alineación de la planificación maestra y la planificación del uso de la tierra, por ejemplo, el desarrollo de carreteras en zonas propensas a las amenazas, o el reajuste de las carreteras para proteger la infraestructura de transporte. Se debe prestar atención a la comprensión de las implicaciones del reasentamiento de las poblaciones y las actividades económicas. Esto se discute con más detalle en la Sección 11.
- Gestión ambiental, por ejemplo, preservando la biodiversidad o conservando la vegetación para ayudar a regular los ciclos hidráulicos y minimizar los impactos de las inundaciones.

## 10.2. EVALUACIÓN DE LA EFICACIA/SEGUIMIENTO DE LAS MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

Según HB 167 e ISO, este paso se denomina "Supervisar y revisar". Como ejemplo de esta evaluación, en mayo de 2017 se celebró un taller de la PIARC sobre estrategias de adaptación para aumentar la resiliencia de la infraestructura, organizado por el Departamento de Transporte y Carreteras Principales de Queensland y Oficina de Investigación en Carreteras de Australia (ARRB, por sus siglas en inglés) y Austroads. Este taller brindó la oportunidad de difundir conocimientos entre la PIARC y todas las esferas del gobierno y las universidades de Australia. En este taller se identificaron una serie de opciones de adaptación que destacan la aplicación de medidas de adaptación de los pavimentos y su eficacia.

Como se indicó en la Sección 10.1.1, la estabilización con asfalto espumado utilizado en Queensland, Australia, es un ejemplo de cómo se está llevando a cabo la eficacia y el seguimiento futuro de esta medida. El rendimiento de estos pavimentos fue probado a través de numerosas inundaciones, incluyendo el ciclón Debbie, 2017.<sup>13</sup> Se identificó que la condición de los pavimentos cuando las aguas de la inundación residían después de este evento permanecía intacta, ver el Cuadro 26 para ejemplos.

---

<sup>13</sup> El ciclón Debbie fue un ciclón de categoría 4 que ocurrió en Queensland en 2017. Este fue el ciclón tropical más fuerte en la región australiana desde el ciclón Quang en 2015, y la tormenta causó 2.400 millones de dólares australianos (1.850 millones de dólares estadounidenses), principalmente como resultado de las inundaciones extremas (<http://www.rpfbuilding.com.au/cyclone-debbie-2017-case-study/>).

#### Cuadro 26: Ejemplos de casos de estudio de la eficacia de la estabilización y el control del asfalto espumado

En Queensland, Australia, existen varios ejemplos de casos de estudio sobre la eficacia de la estabilización con asfalto espumado después de ciclones e inundaciones. Estos incluyen

- « Camp Cable Road », « Bruce Highway » cerca de Bowen, Queensland. Fueron 3 metros de inundación los que impactaron « Camp Cable Road » en Mt Lindsay Highway. Cuando las aguas retrocedieron, se encontró que el pavimento con asfalto espumado estaba completamente intacto.



Camp Cable Road, Queensland, Australia.

Fuente: Departamento de Transporte y Carreteras Principales (TMR), Queensland, Taller Técnico Internacional de la PIARC sobre Estrategias de Adaptación y Aumento de la Resiliencia de la Infraestructura, Brisbane, mayo de 2017.

- “Stegemann Road” en el Ayuntamiento de Logan, Queensland, está identificada como una zona propensa a las inundaciones. La estabilización con asfalto espumado se seleccionó como material del pavimento para equilibrar el costo de construcción y el riesgo de inundación, y se descubrió que seguía funcionando después del ciclón Debbie.



Steggeman Road, Logan City Council, Queensland, Australia.

Fuente: Logan City Council, Queensland Australia, Taller Técnico Internacional de la PIARC sobre Estrategias de Adaptación y Aumento de la Resiliencia de la Infraestructura, Brisbane, mayo de 2017.

- El asfalto espumado aplicada en la planicie de inundación de Yeppen, Queensland, mantuvo el tránsito en movimiento durante la inundación de Rockhampton. Además, no se reportaron daños en sitios clave como Toowoomba Range, Cunningham's Gap, Blackbutt Range y Warrego Highway después de la aplicación del asfalto espumado.

Fuente: Departamento de Transporte y Carreteras Principales (TMR), Queensland, Taller Técnico Internacional de la PIARC sobre Estrategias de Adaptación y Aumento de la Resiliencia de la Infraestructura, Brisbane, mayo de 2017.

## 11. ENFOQUES PARA INCLUIR LA ADAPTACIÓN EN LA VALORACIÓN Y EVALUACIÓN

Cada vez se reconoce más que la adaptación es una parte importante de muchas políticas, ya que el cambio climático inevitablemente afectará a casi todos los sectores de nuestra sociedad. La progresiva adopción de estrategias y planes de adaptación ha ido acompañada de una mayor consideración de los costos y beneficios de las medidas alternativas[48].

Tras la identificación de las medidas de adaptación descritas en la sección 10, es importante priorizar a menudo una larga lista de opciones en un pequeño número a las que se enfrentan la red, los activos, las operaciones y su ubicación. La priorización de estas medidas requiere el uso de técnicas económicas para determinar qué opción de adaptación es la más apropiada para la selección. Por ejemplo, no todas las medidas de adaptación son adecuadas para determinados lugares o desde una perspectiva económica, social o medioambiental. Las opciones seleccionadas pueden ser apropiadas sólo para un lugar determinado (urbano, regional o rural) o tipo de carretera (asfaltada o no asfaltada), y su selección también puede estar determinada por los intervalos de frecuencia de los acontecimientos y el posible deterioro acelerado de los sellos envejecidos de las carreteras. Esta sección presenta una serie de técnicas que se han aplicado a través de ejemplos de casos prácticos. Éstos incluyen los métodos de Análisis Costo-Beneficio (ACB), Costo del Ciclo de Vida (CCV), Análisis MultiCriterios (AMC) y enfoques de Vías de Adaptación (Vías de Adaptación). Otros enfoques también pueden incluir el Análisis de Opciones Reales (AOR), las simulaciones de Monte Carlo, el Análisis de Costo-Efectividad (ACE) y el Análisis de Cartera[49], la Toma de Decisiones Robusta (RDM, por sus siglas en inglés) y la Gestión de Riesgos Iterativos (IRM, por sus siglas en inglés).

El propósito de esta sección es proporcionar información que defina estas técnicas, sin embargo, los pasos para la aplicación de estas metodologías se encuentran en el Marco de la PIARC[4]. Además, se ha identificado que algunas de estas metodologías no están cubiertas actualmente en el Marco de la PIARC. Por lo tanto, algunas de estas mejoras del Marco se proporcionaron al Grupo de Trabajo 2 del Comité Técnico E.1 para su inclusión en el presente informe.

### 11.1. METODOLOGÍAS ECONÓMICAS

Según el proyecto ECONADAPT, la evaluación económica de las medidas de adaptación difiere de una evaluación económica normal en que el análisis se centra en la gestión de las incertidumbres y los riesgos. Debe tener en cuenta las diferentes escalas de tiempo, las complejas relaciones y dinámicas sistémicas, las múltiples fuentes de incertidumbre, etc. El proyecto ECONADAPT del 7PM (2013-2016) tenía como objetivo proporcionar metodologías orientadas al usuario y pruebas relacionadas con los criterios de evaluación económica para informar la elección de las acciones de adaptación al cambio climático mediante un análisis que incorporara la gobernanza a escala cruzada en condiciones de incertidumbre. Un tema crítico fue el apoyo a la aplicación de la economía de la adaptación en el período posterior a la publicación de la Estrategia de Adaptación de la UE para 2013, centrándose en las principales áreas de decisión que requieren una mayor información económica, y en los usuarios clave de dicha información. Este proyecto también reconoce que no se trata de un enfoque único para la evaluación económica de las opciones de adaptación al cambio climático y que cada situación de adaptación es única[48].

ECONADAPT destaca que el análisis económico puede proporcionar información valiosa a los responsables de la toma de decisiones y a las partes interesadas:

- Aportar claridad sobre las compensaciones asociadas a las diferentes vías de desarrollo a medio y largo plazo, y proporcionar una indicación del valor neto de las diferentes opciones en diferentes futuros posibles;
- Destacar, de forma más transparente, el valor de los beneficios futuros, incluida la importancia que las generaciones actuales conceden al futuro. Esto puede, en última instancia, mejorar la consideración de los principios de sustentabilidad en la toma de decisiones;
- Reforzar la capacidad de la sociedad para prever y planificar estratégicamente frente a la creciente incertidumbre y apoyar la identificación de soluciones sólidas capaces de ofrecer un alto rendimiento frente a un gran número de futuros posibles, reforzando así la capacidad de resiliencia de la sociedad frente a los riesgos futuros;
- Presentar un enfoque estructurado para diseñar, implementar y evaluar proyectos, medidas y programas de políticas, y permitir la comparación de las compensaciones entre las estrategias de espera y la acción inmediata. Esto puede, en última instancia, apoyar la aplicación del principio de precaución y mejorar la capacidad de la sociedad para adaptarse a las dinámicas no lineales del clima y el sistema natural[48].

En esta sección se ofrece un panorama general de las diferentes técnicas económicas que pueden considerarse como el enfoque apropiado para escenarios de adaptación específicos. En la Figura 5 se presenta un resumen de los métodos en la economía de la adaptación y su uso potencial.

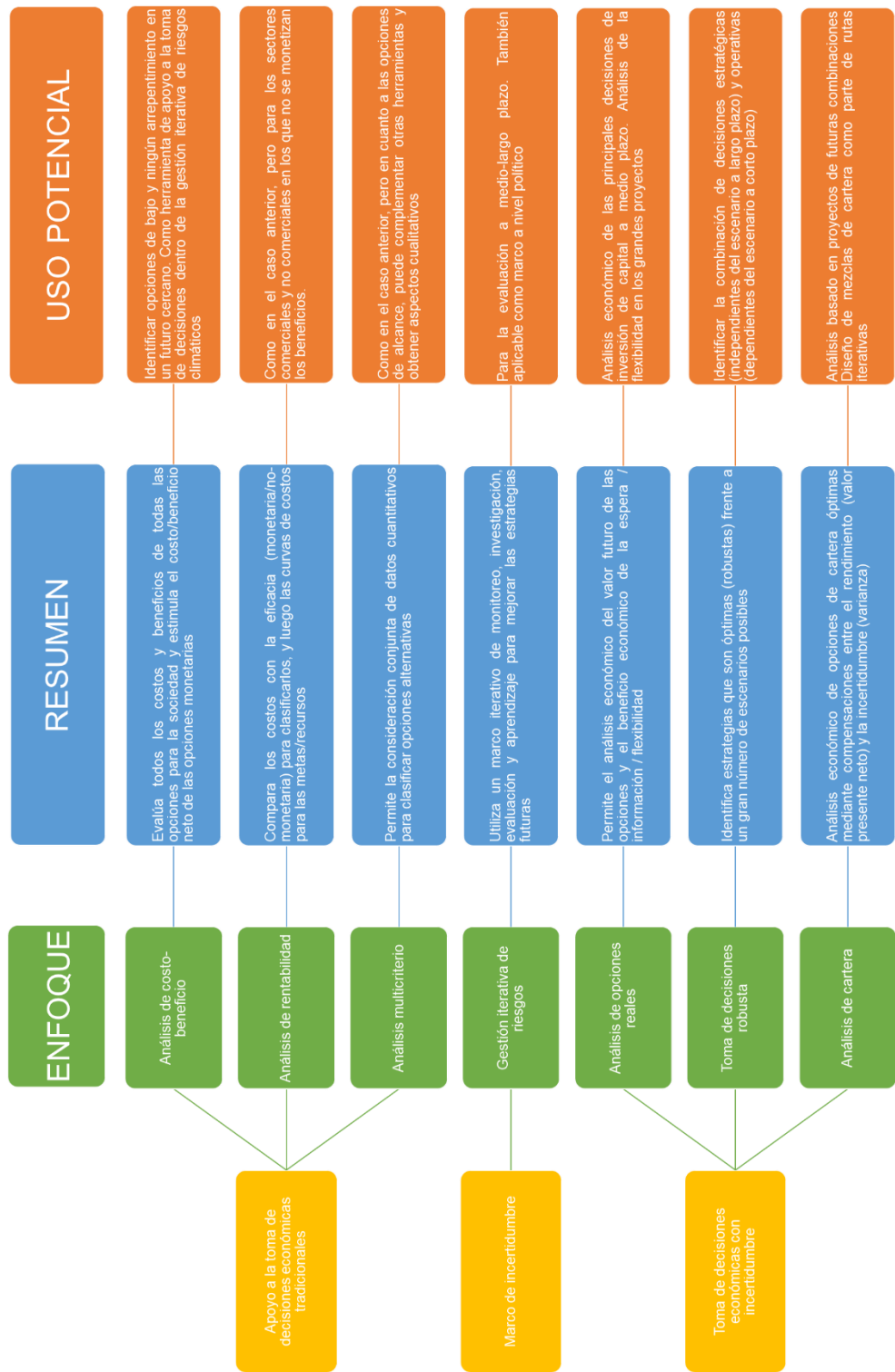


Figura 5: Métodos en la economía de la adaptación y su uso potencial.

Fuente: Tröltzsch, 2016. [48]

Otro ejemplo es la herramienta Arcadis Global, Bankable Resilience Tool (BaRT), que es una herramienta de análisis costo-beneficio y multicriterio que se utiliza para ayudar a las ciudades y a los promotores a evaluar sus opciones de resiliencia a la hora de planificar un proyecto de (re)desarrollo urbano. Esto se aplicó al proyecto de la UE RESIN en Europa.

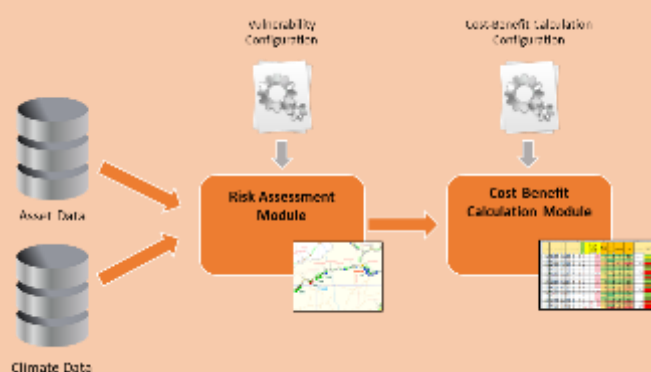
#### 11.1.1. Análisis Costo-Beneficio

El Análisis Costo-Beneficio (ACB) determina la eficiencia económica de un proyecto o política comparando el valor actual neto de los costos de planificación, preparación y ejecución de la intervención de adaptación con sus beneficios. Los beneficios están relacionados con los costos de daños evitados o los beneficios acumulados tras la adopción y aplicación[48]. El ACB se centra en los beneficios y costos asociados de las respuestas de adaptación y debería incorporar los impactos indirectos además del resultado del ACB. Por ejemplo, los impactos indirectos incluyen la reducción del acceso a un tramo de red que puede limitar el turismo o el transporte de mercancías, mientras que la mejora del acceso por carretera mediante la provisión de más tramos carreteros que puedan mejorar el turismo[4]. Este enfoque es quizás apropiado para un análisis que se centra en la variabilidad climática actual (el déficit de adaptación), así como en el Análisis de Costo-Efectividad (ACE). La metodología del ACE se utiliza para comparar diferentes opciones con el fin de lograr resultados similares. El análisis de la relación costo-eficacia suele ser más útil para la evaluación de la adaptación a corto plazo, por ejemplo, cuando se clasifican las opciones de bajo costo y sin arrepentimiento. Esto se debe a que el ACE no se ocupa explícitamente de la incertidumbre y optimiza la selección de las intervenciones de adaptación en función de un único objetivo, generalmente en un escenario climático[48].

Al realizar un ACB, se proporciona a los profesionales información indicativa relativa a los costos, beneficios y respuestas previstos. Las respuestas pueden clasificarse en función de su beneficio total. El beneficio de una respuesta de adaptación para la infraestructura puede medirse por el valor esperado de la reducción de los costos de los daños entre el escenario base de “no adaptación” y el escenario “con proyecto” en el que se ha aplicado la medida de adaptación. El ACB proporciona una estimación del valor actual de los beneficios de la red derivados de la aplicación de las diversas opciones analizadas, y puede utilizarse para evaluar y comparar las diferentes opciones de adaptación o grupos de opciones. A través de un ACB se debe considerar si las respuestas proporcionan beneficios adicionales más allá de la creación de capacidad de adaptación, y si las respuestas mejoran la resiliencia de la infraestructura crítica a expensas de otros sectores de la economía o del transporte[4]. El Marco de la PIARC[4] proporciona más detalles sobre la determinación de los impactos esperados de los eventos sobre los activos carreteros, y sobre cómo determinar los impactos esperados sobre la infraestructura.

Cuadro 27: DeTECToR (Herramientas de apoyo a la toma de decisiones para integrar el pensamiento sobre el cambio climático en las carreteras)

El proyecto DeTECToR (Decision-support Tools for Embedding Climate Change Thinking on Roads) fue encargado a través del Programa de Investigación Transnacional de la Conferencia de Directores de Carreteras de Europa (CEDR, por sus siglas en inglés) para ayudar a las autoridades viales europeas a incluir el cambio climático en los procesos de evaluación económica y contratación. El proyecto incluye el desarrollo de una herramienta de costo-beneficio para permitir la comparación de la eficacia en función de los costos de las diferentes estrategias de adaptación. La herramienta de software tiene dos módulos; el primero permite al usuario evaluar el riesgo climático para su red de carreteras y el segundo comparar los costos de toda la vida útil asociados a las diferentes opciones de adaptación. El usuario carga los datos de los activos y del clima en la herramienta, y configura los ajustes para adaptarlos a su red. El módulo ACB utiliza los datos de costos introducidos por el usuario y el nivel calculado de riesgo climático para estimar el costo total. Esto incluye el costo inicial para implementar la estrategia de adaptación, accidentes, demoras/retrasos de viajes y costos de mantenimiento. El usuario puede comparar diferentes opciones de adaptación, y una opción sin adaptación.



Estructura de alto nivel de la herramienta de costo-beneficio DeTECToR (Reeves et al, 2018)

Fuente: Página web de DeTECToR - <https://detector.trl.co.uk/>

### 11.1.2. Análisis Probabilístico

Como resultado de las incertidumbres en las proyecciones del cambio climático y los riesgos del cambio climático, la cuantificación de los costos y los beneficios puede ser a veces difícil. El análisis probabilístico implica asignar una distribución de probabilidad para el posible valor de cualquier componente específico de costo o beneficio de una respuesta de adaptación, en lugar de un valor determinista único. El resultado es una distribución de probabilidad que representa los nuevos valores actuales, lo que permite el cálculo de un valor actual neto esperado para la opción de respuesta de adaptación[4]. BITRE[50] indica que algunas estimaciones de costos de inversión pueden ser desarrolladas usando enfoques cuantitativos (probabilísticos) de análisis de riesgo. Por ejemplo, los costos del proyecto con suficiente contingencia pueden proporcionar una probabilidad del 50% (P50) y del 90% (P90) de que no se excedan los costos. Aquí, con la mitad de la distribución de probabilidad a cada lado, P50 es la mediana de la distribución de probabilidades[50].

Los resultados del ACB utilizados para la toma de decisiones deben ser los valores esperados, utilizando distribuciones de probabilidad para el VPN (valor presente neto) y el RCB (relación costo/beneficio). Para los costos de inversión, éstos se esbozan asegurando que el valor P50 (mediana) sea igual al valor medio o esperado si la distribución de probabilidad es simétrica. Si este

es el caso, el valor P50 puede ser utilizado como una aproximación de la media del escenario central para un ACB, y el P90 puede ser utilizado como una prueba de sensibilidad para medir los impactos sobre la inversión que son más altos de lo esperado[50].

### 11.1.3. Enfoque de opciones reales y vías de adaptación

Cuando las inversiones son a más corto plazo (especialmente las inversiones irreversibles de capital inicial elevado), existe la posibilidad de aprender a medida que se dispone de nueva información sobre el riesgo climático, y cuando existe un déficit de adaptación, el Análisis de Opciones Reales (ROA, por sus siglas en inglés) es una herramienta potencialmente útil[48].

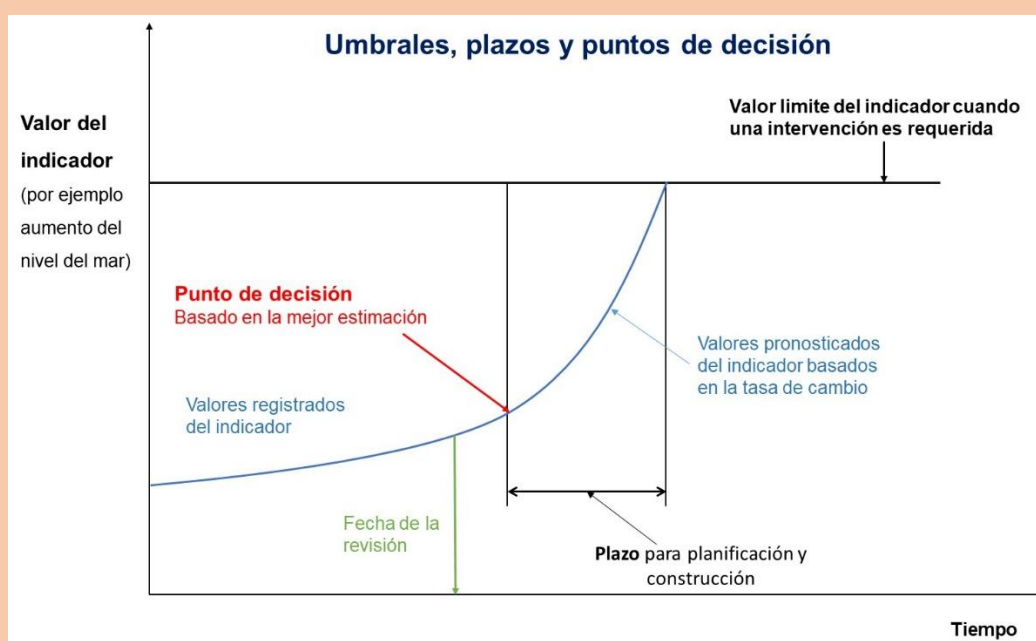
El análisis de opciones reales cuantifica el riesgo de inversión asociado con resultados futuros inciertos y se utiliza al considerar el valor y la flexibilidad de las inversiones. Se puede utilizar para informar cómo un proyecto puede adaptarse, expandirse o reducirse en respuesta a eventos que se desarrollan (Watkiss et al. 2013 citado en[51]). Identificar y evaluar las opciones a lo largo del tiempo puede ser una manera poderosa de abordar el riesgo de una caída (el riesgo de un mal resultado). Una opción real es una decisión que se tome hoy y que permita a los responsables políticos adoptar una determinada medida en el futuro. Se exploran opciones que implican la adopción de un enfoque de "esperar y ver" hasta que se resuelva o se reduzca una gran incertidumbre y el proyecto tenga más éxito[50].

Las vías de adaptación son un enfoque similar, en virtud del cual, una vez que se han determinado los tratamientos de riesgo, a menudo se organizan en una secuencia a fin de responder y ser flexibles a las circunstancias cambiantes. Esta secuencia de tratamientos de riesgo puede denominarse como una vía de adaptación. Cada camino de adaptación que se forma, puede ser considerado como una opción de adaptación[45].

Las vías de adaptación pueden ser cortas y únicas, o más comúnmente pueden ser más complejas, particularmente para activos más grandes donde la gestión del riesgo es un proceso de toma de decisiones adaptativa a lo largo del tiempo. Las vías de adaptación generalmente establecen un proceso estructurado y continuo de evaluación e implementación de tratamientos de riesgo en respuesta a nueva información y circunstancias cambiantes[45]. Un ejemplo de vías de adaptación se muestra en el Cuadro 28 para el río Támesis. Se puede encontrar más información sobre los costos de adaptación en Dore y Burton, 2011[52].

Cuadro 28: Vías de adaptación aplicadas en el estuario del Támesis 2100, Inglaterra

El estuario del Támesis 2100 (TE2100) es un plan desarrollado por la Agencia de Medio Ambiente (inglesa) para la gestión del riesgo de inundación de las mareas en Londres desde el río Támesis. El plan, publicado en 2012, aplica un enfoque de vías de adaptación, teniendo en cuenta las proyecciones climáticas existentes, pero también está siendo diseñado para adaptarse a las proyecciones futuras. TE2100 evaluó las defensas contra inundaciones del estuario del Támesis, que incluyen la barrera del Támesis y 350 km de muros de contención, terraplenes, estaciones de bombeo y compuertas a la luz de las proyecciones de aumento del nivel del mar, y hace recomendaciones sobre cómo continuar la protección de los 1,3 millones de personas y los 275.000 millones de libras esterlinas de propiedades a las que sirven estas defensas. La estrategia empleada incluyó el desarrollo de los peores escenarios climáticos para estimar el aumento potencial del nivel del mar, el diseño de opciones de adaptación de alto nivel y la evaluación de las mismas para determinar la magnitud del aumento del nivel del mar contra el que es probable que se protejan, así como la realización de un análisis costo-beneficio de los mismos para diferentes escenarios climáticos. Se estimaron los plazos para cada opción de adaptación y se determinaron los puntos de decisión en los que habría que aprobar las respuestas para que la medida se aplicara antes del umbral. La estrategia se revisa cada 5 a 10 años, y si la tasa de cambio climático ha cambiado, se revisan las implicaciones para los puntos de decisión. Esta estrategia permite optimizar la relación costo-beneficio frente a la incertidumbre y mantener abiertas todas las opciones, por ejemplo, garantizar el mantenimiento de las tierras que podrían ser necesarias en el futuro. Se están adoptando medidas sobre la base de las recomendaciones basadas en las proyecciones actuales, pero en el futuro se podría pasar a intervenciones más amplias si fuera necesario.



*Umbrales, plazos y puntos de decisión (Tesorería de Su Majestad, 2009)*

Fuente: Contabilidad de los efectos del cambio climático, guía suplementaria para los libros verdes (Tesoro de Su Majestad, 2009)

#### 11.1.4. Análisis multicriterio

La PIARC[4] identifica que el Análisis Multicriterio (AMC) es una evaluación comparativa de opciones que tiene en cuenta varios criterios simultáneamente. En comparación con el ACB, muchos costos y beneficios pueden valorarse en términos monetarios, aunque muchos impactos

ambientales y sociales son de naturaleza más cualitativa. Por lo tanto, el AMC ofrece una metodología para la evaluación de los impactos del cambio climático que no pueden ser valorados en términos monetarios, por ejemplo, sensibilidad política, aceptación pública y algunos impactos ambientales[4].

Dado que las intervenciones de adaptación se realizan a menudo en áreas que son difíciles de valorar y que, por lo general, implican una falta de información cuantitativa, a menudo se utiliza el Análisis Multicriterio[48]. El AMC proporciona una evaluación comparativa de las opciones y las clasifica según criterios simultáneamente. Las ventajas y desventajas de esta metodología, así como los pasos para su aplicación, figuran en el Marco de la PIARC[4].

#### 11.1.5. Cálculo del costo del ciclo de vida

Una medida ampliamente utilizada de los impactos económicos del cambio climático es la aplicación de las evaluaciones del Costo del Ciclo de Vida (LCC, por sus siglas en inglés), que estiman los costos de las agencias de carreteras y los costos de los usuarios de las carreteras sobre la base de la predicción y los cambios en las condiciones de las carreteras y el uso del tránsito. Al llevar a cabo estas evaluaciones, los costos de las agencias representan los ahorros resultantes de la adopción de prácticas más eficaces de mantenimiento, reparación, rehabilitación y resellado de los pavimentos. En el marco de los impactos proyectados del cambio climático, se espera que los costos de los organismos aumenten, a menos que se consideren medidas más resilientes. Otros costos incluyen los costos de accidentes, los costos de explotación de los vehículos, los costos de los retrasos en el viaje y los costos asociados a los retrasos en la entrega de la carga[7].

El análisis del LCC permite una gama flexible de insumos y variables, con el fin de modelar mejor los efectos del ciclo de vida del cambio climático en los activos. Este método aplica una serie de opciones alternativas e implica probar la sensibilidad del modelo a los cambios en las variables de entrada clave, por ejemplo, la frecuencia de los eventos. El análisis del LCC considera el daño en sí mismo, su tiempo y costo de recuperación inmediata, su reconstrucción final y el costo de las reparaciones, los retrasos de la comunidad y la industria, y otros costos de los usuarios de las carreteras, como un cambio general en el valor presente neto (VPN) de todas las opciones. Incluye los costos del ciclo de vida de 'lo que realmente ocurrió' (caso base) y dos posibles alternativas, un enfoque de mantenimiento preventivo y un enfoque de resiliencia total. Estos pueden ser utilizados y comparados para un análisis de los costos y beneficios de las iniciativas de adaptación para mejorar la resiliencia. Esto también ayuda a identificar las soluciones óptimas aplicables en diferentes circunstancias operativas, siendo los niveles actuales de tránsito el principal impulsor de las soluciones, habiendo tenido en cuenta los impactos de las interrupciones[7]. Esta metodología ha demostrado ser muy eficaz a la hora de priorizar las medidas de adaptación y maximizar el rendimiento de la inversión para las agencias de carreteras.

#### 11.1.6. Otros enfoques

Otros enfoques utilizados en la aplicación de la gestión de riesgos y la adaptación incluyen[48]:

- Para aplicaciones a largo plazo en condiciones de un bajo déficit de adaptación actual, la gestión iterativa de riesgos (IRM, por sus siglas en inglés) puede ser más aplicable.
- Para el análisis de la adaptación frente a la incertidumbre, cuando el riesgo de mala adaptación es alto, se puede emplear la Toma de Decisiones Robusta (RDM, por sus siglas en inglés). RDM tiene una amplia aplicación para los períodos de tiempo actuales y futuros y se centra en la robustez más que en la optimización como criterio de decisión;

- Para el análisis en condiciones de alta incertidumbre de combinaciones de proyectos de adaptación que son potencialmente complementarios, el Análisis de Cartera (PA, por sus siglas en inglés) puede ser un enfoque útil.

## 11.2. PRIORIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE OPCIONES DE RESILIENCIA

Se reconoce que, históricamente, los programas de obras se han centrado en la consecución de tratamientos de máxima prioridad que, en algunos casos, han provocado un deterioro general del estado de la red a lo largo del tiempo, por ejemplo, medido mediante indicadores de estado tales como la rugosidad y la edad del sellado. Ha habido un cambio hacia el logro de programas de mantenimiento y rehabilitación más estratégicos y oportunos en comparación con los programas de reconstrucción más importantes que se llevan a cabo una sola vez, frente a los impactos del cambio climático[36].

También se reconoce que los fondos disponibles para las obras de mantenimiento, rehabilitación y resellado de pavimentos son limitados, y que existen retos asociados con la gestión de la red en términos del impacto del cambio climático (otros temas como el aumento de la carga por eje también tiene que ser gestionado, esté o no asociado con el cambio climático). Como resultado, se reconoce la necesidad de revisar las prácticas de gestión, mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos para reducir la exposición a los daños de una manera rentable[36].

### 11.2.1. Enfoques económicos para seleccionar y priorizar las medidas y respuestas de adaptación

Esta sección muestra los principales resultados de un proyecto bajo el programa del Centro de Excelencia de Activos Nacionales (NACoE, por sus siglas en inglés) que analizó las implicaciones del costo del ciclo de vida de los eventos de lluvias e inundaciones en Queensland, Australia[36]. Esto se ha llevado a cabo a través de una serie de casos de estudio bajo tres estrategias diferentes; un caso base que refleja la experiencia real con un presupuesto limitado de rehabilitación y mantenimiento, un enfoque preventivo de mantenimiento "stitch-in-time" (reparar a tiempo) con umbrales de intervención e impactos de eventos reducidos, y un enfoque de "resiliencia total" (robustez total) que incorpora una reconstrucción extensiva y una visión de inmunidad total a las inundaciones. A través del cálculo de los costos del ciclo de vida, se han determinado y utilizado los ahorros de costos de la agencia, los ahorros de costos de accidentes y otros costos (costos en los que se incurre durante las inundaciones y las lluvias, costos elevados para los usuarios de la vía pública debido a pavimentos prematuramente dañados superficialmente, costos del tiempo debido a los límites temporales de velocidad, costos de flete debidos a viajes prolongados o retrasados durante los eventos y el valor de los viajes cancelados debido a carreteras cerradas), y con ellos estimar los costos totales de transporte y los ahorros económicos potenciales. Esto también ayuda a identificar las soluciones óptimas aplicables en diferentes circunstancias operativas, siendo los niveles actuales de tránsito el principal impulsor de las soluciones, habiendo tenido en cuenta los impactos de las interrupciones[36].

El "stitch-in-time" o reparar a tiempo, frente a la resiliencia total (robustez) implica opciones de tratamiento del riesgo. Con la "plena resiliencia" el riesgo se mitiga completamente (sin consecuencias), mientras que para "stitch-in-time" el riesgo no se mitiga completamente, sino que se reduce (consecuencias menos graves)[36].

El Valor Presente Neto (VPN) y la Relación de Costo de Beneficio Marginal (RCBM) bajo cada uno de los escenarios identificados anteriormente fueron calculados de acuerdo a la metodología descrita en las Directrices Nacionales para la Gestión del Sistema de Transporte en Australia

(Australian Transport Assessment and Planning Guidelines) (Australian Transport Council 2006 in[36]), y los resultados se describen en el Recuadro 30. Además, también se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para acelerar el deterioro de las carreteras en los sellos envejecidos, o para abordar la incertidumbre que rodea a los futuros efectos climáticos en la red de carreteras. Se consideraron tres intervalos de recurrencia de las inundaciones, a saber, más largo, normal y más corto[36] (véase el recuadro 30 para más información).

Los resultados se agregaron para poder determinar qué opción de resiliencia, por ejemplo, resiliencia total o mantenimiento preventivo, sería más apropiada para un lugar o tipo de carretera en particular en función de los aumentos o disminuciones de la frecuencia de los acontecimientos[36]. Los resultados se identifican en el recuadro 29.

#### Cuadro 29: A4: Contabilidad de las implicaciones del cálculo del costo del ciclo de vida y de los riesgos de rendimiento de la red en caso de lluvias e inundaciones, Queensland, Australia

Entre 2009 y 2013, Queensland experimentó cierres de carreteras entre el 23 y el 62% de sus carreteras debido a un aumento en la frecuencia y severidad de las tormentas. Aproximadamente el 26%, es decir, 8.741 km de la red controlada por el Estado, requería una reconstrucción total o parcial.

El proyecto tenía por objeto aclarar al Departamento de Transporte y Carreteras Principales (TMR), de Queensland y a los organismos gubernamentales de financiación las repercusiones de las lluvias, las inundaciones y los fenómenos meteorológicos extremos en el costo del ciclo de vida, así como los niveles de financiación necesarios para permitir que se alcance el nivel de servicio deseado, por ejemplo, "¿Cuáles son los beneficios económicos de mejorar la capacidad de la red de carreteras para resistir mejor los efectos de las inundaciones y cómo se podría hacer"? Se seleccionaron siete casos de estudio en cuatro regiones representativas de Queensland, en función del volumen de tránsito, la función y la frecuencia de las inundaciones, para poder extraer algunas conclusiones sobre toda la red. Los factores de riesgo elegidos incluyeron el propio daño, su tiempo y costo de recuperación inmediata, su reconstrucción final y el costo de las reparaciones, las demoras de la comunidad y de la industria y los costos asociados.

El modelo se llevó a cabo durante un período de análisis de 30 años, de modo que se pudo incorporar un período de varios años antes del evento principal, así como un período de tiempo significativo después para permitir que se hicieran suposiciones razonables con respecto a los intervalos de recurrencia de eventos futuros. Además, el análisis consideró la condición, por ejemplo, basándose en el nivel de deformación y rugosidad medido antes del evento, y la vulnerabilidad basada en una combinación de la anchura de la junta, la edad de la junta, la edad del pavimento y las propiedades del suelo para tramos de carretera de 1 km de longitud. Se identificaron tres casos de estudio y se compararon los resultados de cada uno de ellos de la siguiente manera:

#### **Caso base:** Que paso realmente

- Modela la red antes de los eventos y la respuesta del PRTN
- Datos reales sobre cierres, costos de reconstrucción, estado de las carreteras
- Reconstrucción basada en los daños sufridos

#### **Opción 1:** Resiliencia total

- Se requiere un trabajo extensivo de rehabilitación para que la conexión sea totalmente resiliente.
- Red casi inmune a todos los efectos de las inundaciones

#### **Opción 2:** "Reparar a tiempo"

- Reducción de los intervalos de resellado y rehabilitación
- La reducción de la vulnerabilidad de la red conduce a una reducción del costo de reparación y a una reducción del mantenimiento continuo
- Opciones de rehabilitación más rentables.

El caso base utiliza información histórica de la base de datos de cierre de carreteras, informes de finalización de la reconstrucción y datos generados por TMR para cuantificar el impacto del costo del ciclo de vida de los fenómenos de lluvia e inundaciones en la red. La financiación en este escenario es a menudo limitada, y las obras más importantes se realizan después de los daños ocasionados por los eventos. La opción de resiliencia total representa un escenario en el que la carretera ha sido diseñada para ser lo suficientemente inmune a los acontecimientos, y no se requerirían obras de reconstrucción después de un acontecimiento importante, y se reducirían los retrasos debidos al cierre de las carreteras.

La opción "reparar a tiempo" aboga por un trabajo periódico importante dirigido a las secciones vulnerables con puntos de activación más agresivos para los trabajos de reparación. La red es más inmune a los efectos inmediatos y los programas de reparación posteriores a los eventos son una fracción de la magnitud actual. Es posible que se produzcan retrasos en este punto, pero los daños se reducirán considerablemente y permitirán realizar trabajos emergentes más rápidos para reabrir las secciones.

Si se considera a nivel de red, incluida la contabilización de los niveles de tránsito en rutas específicas, se ha llegado a la conclusión de que las diferentes combinaciones de las opciones 1 o 2 podrían ser más adecuadas para determinadas carreteras, como se muestra a continuación.

| Rutas Principales                                                                                                                                                                             | Red de carreteras rurales                                                                                                                                                                           | Desarrollo de carreteras y enlaces remotos                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beneficio de una alta inversión para crear pavimentos totalmente resilientes</li> <li>• Valor considerable en mantener la transitabilidad</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se necesita análisis para la vulnerabilidad</li> <li>• Rutas críticas se benefician del aumento de la resiliencia</li> <li>• Inversión dirigida</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo muy elevado para ofrecer resiliencia total a los bajos volúmenes de tráfico</li> <li>• Importante para mantener la conectividad básica</li> </ul> |

Utilizando estas opciones, puede determinarse que la Opción 1 representa una carretera totalmente resiliente que se modeló para aumentar los costos del ciclo de vida durante los siete casos, con unos costos de agencia muy elevados que no se compensan suficientemente con unos costos reducidos para los usuarios de la carretera. Se consideró que este enfoque era el más adecuado para las rutas con mucho tránsito, en las que los cierres y las obras de reparación tienen un costo elevado y deben evitarse en la medida de lo posible. La Opción 2 es donde se estima que los programas de rehabilitación progresiva más proactivos y focalizados con un enfoque de mantenimiento preventivo (reparar a tiempo) proporcionan un ahorro neto de costos en el ciclo de vida muy superior al de la Opción 1. Esto supuso un pequeño aumento de los costos de la agencia que se compensó con creces en la reducción de los costos de los usuarios de la carretera gracias a una red más resiliente. Al comparar el caso base y dos opciones alternativas, se encontró que esto equivale a una relación costo-beneficio marginal (RCBM) de 6.9 para el modelo de "stitch-in-time", por lo que un dólar extra de gasto de la agencia en la selección de carreteras devuelve \$6.90 en ahorros de costos para el usuario de la carretera.

Fuente: Beecroft, Peters y Toole: Conferencia ARRB 2016; Beecroft & Peters, National Asset Centre of Excellence Project A4, 2017. [7, 36]

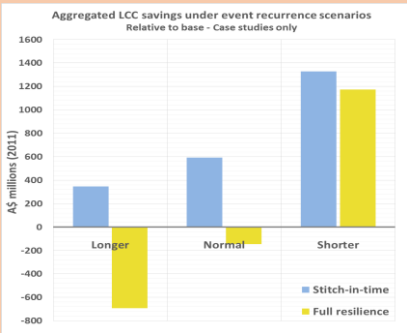
Cuadro 30: Intervalos de repetición de eventos futuros importantes: análisis de sensibilidad utilizando LCC, Queensland, Australia

Los resultados identificados en el recuadro 30 para el análisis del TMR, el análisis del LCC presentan una imagen de los cambios hacia uno de las alternativas, sin embargo, se observó que el análisis se basó en una serie de supuestos críticos. Sigue existiendo un alto grado de incertidumbre en los impactos del cambio climático, por lo que se seleccionaron dos factores críticos para el análisis de escenarios adicionales con el fin de evaluar el impacto que estas incertidumbres tienen en los resultados finales. Esto incluyó el impacto de variar el intervalo de recurrencia de los principales eventos climáticos, y también la implementación de un deterioro acelerado en los sellos envejecidos para simular el "descenso del desempeño" que han experimentado las regiones después de que se haya superado la edad objetivo de las focas.

Se evaluaron tres intervalos de recurrencia y se compararon con los resultados generados por el modelo de costo del ciclo de vida como se indica a continuación:

- Intervalos de recurrencia más largo - donde los eventos se consideran eventos "únicos en la vida".
- Intervalo normal de recurrencia - que anticipa un evento importante adicional en el período de análisis de 30 años.
- Intervalo de recurrencia más corto - con múltiples eventos de lluvias e inundaciones severas (según los experimentados durante 2010-2013 en Queensland).

Cada uno de los siete casos de estudio se analizó bajo cada intervalo y reveló los siguientes resultados:



Con una opción de reparar a tiempo, el impacto de intervalos más cortos se reduce considerablemente, con un gran aumento de los costos del ciclo de vida. Esto se puede atribuir a pequeños aumentos de los costos tanto de las agencias como de los usuarios de las carreteras. También se encontró que la construcción de una red totalmente resiliente aísla a la red contra el riesgo de un aumento de los eventos. Se identificó que, en general, el cambio hacia un modelo de reparar a tiempo sigue siendo beneficioso, debido en gran medida a la conveniencia de espaciar la rehabilitación a lo largo de muchos años, en lugar de centrar los trabajos más importantes en un período estrecho después del evento.

*Fuente:* Beecroft, Peters y Toole: Conferencia ARRB 2016; Beecroft & Peters, National Asset Centre of Excellence Project A4, 2017. [7, 36]

**Recuadro 31: Un ejemplo de enfoque semicuantitativo para evaluar los riesgos y priorizar las opciones de adaptación**

La Agencia de Carreteras de Gran Bretaña ha publicado en 2009 un Marco que proporciona un proceso sistemático para identificar las actividades que se verán afectadas por el cambio climático, determinar los riesgos asociados e identificar las opciones preferidas para abordarlas y gestionarlas.

El proceso se divide en siete pasos:

- definir objetivos y criterios de toma de decisiones;
- identificar las tendencias climáticas que afectan a la Agencia de Carreteras;
- identificar las vulnerabilidades de la Agencia de Carreteras;
- evaluación de riesgos;
- análisis de opciones para abordar las vulnerabilidades; y
- elaborar y aplicar planes de acción de adaptación.

La identificación de las principales vulnerabilidades y la evaluación del riesgo se basa en criterios semicuantitativos tales como: la extensión y la gravedad (duración) de la perturbación, la incertidumbre del cambio climático, etc.

Esta es una base para llevar a cabo un análisis de las opciones de adaptación, para lo cual la Agencia de Carreteras propone:

- identificar primero la opción de adaptación factible;
- para luego determinar los resultados esperados de estas opciones;
- estimar los costos y beneficios financieros; y
- determinar la opción preferida comparando varios escenarios de adaptación: un escenario "hacer lo mínimo", un escenario "diseños con futuro probado", etc.

Fuentes: Agencia de Carreteras. [34; 47]

**11.2.2. Cuestiones económicas más amplias**

A través de eventos pasados se ha identificado que el cambio climático puede tener implicaciones económicas más amplias. Un ejemplo de este complejo problema se puso de relieve en 2006 cuando el ciclón Larry, en el norte de Queensland, causó graves daños a la infraestructura vial y a los cultivos, tales como, las plantaciones de plátanos. Esto tuvo efectos de flujo a la economía, donde el gasto gubernamental fue requerido para rehabilitar comunidades y reintroducir la accesibilidad a estas comunidades afectadas por las inundaciones. Otros impactos incluyeron aumentos en el precio de los bananos para los consumidores, e implicaciones para la industria del transporte en términos de reducción de la demanda de transporte debido a la pérdida de producción[36; 44]. También hubo impactos en la comunidad, como la pérdida de empleo, la pérdida de ingresos y la depresión, que a menudo no se incorporan en una evaluación, aunque desempeñan un papel importante en la recuperación posterior al evento.

Deberían tenerse en cuenta otros impactos económicos, tanto a corto como a largo plazo, por ejemplo, los impactos directos o a corto plazo incluyen el cierre de carreteras/ferrocarriles, y el

agrietamiento, espeleología o exudado de superficies de pavimentos debido al aumento de la frecuencia y severidad de las olas de calor y de los eventos de lluvia/inundaciones. Por lo tanto, estos acontecimientos deben tenerse en cuenta en el diseño, la localización y el mantenimiento de las redes de transporte nuevas y existentes. Los impactos indirectos, o a más largo plazo, pueden incluir los efectos sobre la ubicación de las poblaciones y la actividad humana que alteran la demanda de transporte[32]. Además, los impactos a corto y largo plazo pueden resultar en mayores costos de mantenimiento. Por ejemplo, el aumento de la temperatura acelerará el ritmo de deterioro de los aglutinantes de las juntas y requerirá un tratamiento o restablecimiento más temprano de la superficie. Un problema asociado es la nueva generación de vehículos pesados de varios ejes que aplican mayores cargas al pavimento. Estos eventos requieren la necesidad de implementar respuestas más adaptables al clima.

Además, hay muchos efectos de flujo en la red de transporte y en la comunidad que se derivan del deterioro de la infraestructura de transporte debido al cambio climático. Los efectos de flujo de un evento de calor extremo, por ejemplo, se describen en la Figura 6.

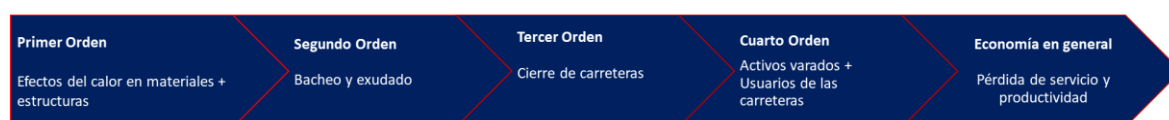


Figura 6: Efectos de flujo de los impactos del cambio climático en el transporte[Adaptado de 59]

Fuente: El Instituto Climático (2013)

Un ejemplo de proyecto que cuantifica los costos y beneficios de la evaluación de los impactos del cambio climático y los impactos en otros sectores se demuestra en el proyecto “Costo de la inacción - Evaluación de los costos del cambio climático para Austria” (Include Cost of Inaction - Assessing Costs of Climate Change for Austria, COIN). Esto se describe con más detalle en el recuadro 32.

**Cuadro 32: Costo de la inacción - Evaluación de los costos del cambio climático para Austria (COIN)**

"¿Cuáles son los costos derivados del cambio climático en Austria, si no nos adaptamos?" Esta es la pregunta clave planteada por el proyecto COIN (COst of INaction), que cuenta con el apoyo del Fondo para el Clima y la Energía del Gobierno Federal de Austria en el contexto del Programa Austriaco de Investigación Climática (ACRP). La respuesta a esta pregunta es importante para los responsables políticos, así como para las empresas y los hogares, porque lo que importa en última instancia es que consideremos cuidadosamente las medidas que hay que tomar para mantener los costos del cambio climático lo más bajos posible. Para ello, un consorcio de doce instituciones de investigación austriacas investigó la gama de costos y beneficios adicionales que se derivarán del cambio climático (sin planes de adaptación) en las próximas décadas, hasta el año 2100. Con respecto a los posibles impactos del cambio climático, el proyecto se centra en 13 áreas y campos de actividad en toda la sociedad y la economía austriacas. Entre ellas figuraban la agricultura, la silvicultura, la salud humana, los ecosistemas y la biodiversidad, el suministro de agua, la electricidad, la construcción y la vida, la calefacción y la refrigeración, el transporte y la movilidad, la industria manufacturera y el comercio, la gestión de desastres naturales, los espacios urbanos y el turismo.

Para cuantificar los costos y beneficios, el proyecto COIN ha desarrollado, por una parte, métodos económicos para evaluar el impacto del cambio climático y, por otra, ha identificado las condiciones climáticas que provocan los costos en las distintas áreas y campos de actividad. Por lo tanto, un aumento de las olas de calor como la de 2003 y sus consecuencias para la salud humana puede dar lugar a un aumento de los costos del sistema de atención de la salud y de gestión de desastres, especialmente para los ancianos y los enfermos. Para ofrecer una visión global de los costos potenciales, las doce áreas no sólo se consideran individualmente. Los daños en las carreteras causados, por ejemplo, los deslizamientos de lodo, no sólo causan costos directos de reparación, también provocan interrupciones en el transporte de pasajeros y mercancías, lo que, a su vez, puede provocar una pérdida de producción industrial. Por consiguiente, la pérdida de producción en la agricultura o la silvicultura también conduce a pérdidas en otros sectores de transformación. COIN esboza estas interdependencias y los efectos consiguientes para permitir una estimación de todos los costos directos e indirectos.

Fuente: Cambio climático en Austria: The Costs of Inaction, 2015. [53]

### **11.3. DESARROLLAR UN PLAN DE ACCIÓN DE ADAPTACIÓN Y VERIFICAR LA RENTABILIDAD DE LAS MEDIDAS A POSTERIORI Y LA REALIZACIÓN DE LOS BENEFICIOS**

Una vez que se ha dado prioridad a las medidas de adaptación más apropiadas, y se han priorizado y clasificado una lista de opciones como se ha indicado anteriormente, es necesario implementar estas respuestas de adaptación. Esto requiere la determinación de una serie de acciones, plazos y responsabilidades[4].

El Marco de la PIARC destaca que un Plan de Adaptación proporciona un medio para lograrlo, detallando los plazos en los que deben aplicarse las medidas de adaptación y la presentación de la financiación necesaria. Este enfoque se describe en detalle en el Marco de la PIARC[4].

El monitoreo y revisión continua de los riesgos, las vulnerabilidades y la eficacia de las iniciativas de adaptación al cambio climático son esenciales. Esto implica la revisión de los hallazgos, estrategias y planes a medida que se dispone de más información y de que aparecen nuevos riesgos. Los pasos para llevar a cabo esta parte de la evaluación se encuentran en el Marco de la PIARC[4].

## 12. CONCLUSIONES

Como se ha señalado, el propósito de este informe es articular la tarea del Grupo de Trabajo 1 y poner de relieve un análisis de casos prácticos sobre las estrategias de adaptación para aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera a nivel de políticas, estrategias, o a nivel de red o de proyectos específicos. Se ha desarrollado en paralelo con la tarea del Grupo de Trabajo 2, que consiste en perfeccionar el Marco de la PIARC y basarse en el trabajo desarrollado en el ciclo anterior. Esboza los detalles metodológicos que respaldan cada etapa del Marco de la PIARC, por lo que ambos informes están muy interrelacionados.

Este informe para el Grupo de Trabajo 1 incluye ejemplos de casos de estudio sobre el estado actual de la técnica en cuatro áreas principales. De acuerdo con el Plan Estratégico de la PIARC, estos incluyen las necesidades de datos para la evaluación de la exposición, las evaluaciones de la vulnerabilidad y criticidad de las carreteras, las medidas de adaptación y los enfoques económicos para evaluar qué medidas de adaptación proporcionan las respuestas más rentables. Éstas se han presentado en este informe a través de casos de estudio sobre el estado actual de las estrategias de adaptación y la resiliencia.

Se prevé que los resultados de este informe del Grupo de Trabajo contribuirán a la aplicación del Marco de la PIARC y existen oportunidades para ampliar este trabajo a otros ciclos. Esto puede incluir la consideración de la inclusión de ejemplos trabajados de acuerdo a los enfoques metodológicos identificados en este informe del GT1. Esto implicaría la integración de casos de estudios de mejores prácticas y requisitos de datos y la conversión de éstos en ejemplos prácticos para cada fase del Marco actualizado. Esto será considerado en el próximo Plan Estratégico para el ciclo 2020-2023.

### 13. BIBLIOGRAFÍA / REFERENCIAS

- [1] Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A.J. y Wehner, M. (2013). Cambio climático a largo plazo: Proyecciones, compromisos e irreversibilidad. In: Cambio climático 2013: La Base de la Ciencia Física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE.UU.
- [2] Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'rourke, T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W.A., Von Winterfeldt, D. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, *Earthquake Spectra* 19(4), p737-738.
- [3] Evans, C., Goger, T., Kovarik, J., Sensvold, B., Krieger, J., Palhol, F., van den Hark, M. (2016). Recorrido de digitalización de FEHRL: Infrastructure Resilience in South Korea and Japan, Australian Road Research Board and Forum of European National Highway Research Laboratories.
- [4] PIARC (2015). Marco Internacional para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera, Referencia 2015R03EN, PIARC, París.
- [5] CEREMA (2016). Análisis de riesgos Nancy-Brabois - Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, componente de infraestructura y sistemas de transporte, acción 4. CEREMA, Francia.
- [6] CEREMA (2017). Análisis de riesgos DIR Mediterráneo. CEREMA, Francia.
- [7] Beecroft, A., Peters, E., Toole, T. (2016). Life-cycle costing of rain and flood events in Queensland - Case studies and network-wide implications, 27th ARRB Conference, Melbourne.
- [8] Drejza, S., Friesinger, S., Bernatchez, P. (2015). Vulnerability of Eastern Quebec's road infrastructure to coastal erosion and flooding in the context of climate change - Volume 3, Laboratory of Coastal Dynamics and Integrated Management, UQAR, Quebec.
- [9] Kalantari, Z. (2014). Road structure under climate and land use change, KTH royal institute of technology, PhD Thesis, TRITA LWR PhD 2014:01, Estocolmo.
- [10] Nickman, A. (2016). Desastres en la carretera? Modelado y evaluación de carreteras suecas en condiciones climáticas cruciales, Instituto Real de Tecnología KTH, Tesis doctoral, TRITA LWR PhD 2016:06, Estocolmo.
- [11] Michaelsen, A. (2015). Modelling flood risk of transport infrastructure based on watershed characteristics, KTH royal institute of technology, Master Thesis, TRITA-IM-EX 2015:06, Estocolmo.
- [12] Briel, A. (2013). Hydrological modelling at road structures in a changing climate and landuse, KTH royal institute of technology, TRITA-LWR-EX-13-35, Stockholm.
- [13] Kalantari, Z. (2011). Adaptación de las estructuras de drenaje de las carreteras al cambio climático. Instituto Real de Tecnología de KTH, TRITA-LWR-LIC 2061, Estocolmo.
- [14] CEREMA (2015). Análisis del riesgo de fenómenos climáticos extremos en infraestructuras, sistemas y servicios de transporte - Plan nacional de adaptación al cambio climático: infraestructuras y sistemas de transporte, acción 3, Cerema, Francia.

- [15] Miralles-Wihelm, F., Muñoz Castillo, R. (2014). Servicios climáticos: A tool for adaptation to climate change in Latin America and the Caribbean: Action plan and case study applications, Banco Interamericano de Desarrollo, IDB-TN-531.
- [16] PICC (2013). Cambio climático 2013: La Base de la Ciencia Física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, y Nueva York, NY, Estados Unidos.
- [17] L'herault, E., Allard, M., Barrette, C., Dore, G. Sarrazin, D. (2012). Investigaciones geotécnicas, caracterización del permafrost y estrategia de adaptación en un contexto de cambio climático para los aeropuertos de Umiujaq, Inukjuak, Puvirnituk, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk y Tasiujaq, Nunavik, Universidad Laval.
- [18] Gravel Gaumond, F., Dore, G. (2013). Suivi des comportements thermique et mécanique du remblai de la piste de Puvirnituk, Informe GCT-2013-03, Ministère des Transports du Québec.
- [19] L'herault, E., Allard, M., Lemay, M., Barrette, C., Carbonneau, A.-S., Duchar, M.-A. (2015). Carretera de acceso al aeropuerto de Tasiujaq: desarrollo de conocimientos sobre las propiedades del permafrost e identificación de soluciones de adaptación en el contexto del cambio climático, Universidad Laval.
- [20] CEREMA, CARBONO 4 (2018). Informe sobre la realización de un análisis de riesgos según una metodología impuesta y evaluación de esta metodología, CEREMA, Francia.
- [21] Bednar-Fiedl, B. (2014). Adaptation costs - an economic assessment for prioritizing adaptation measures and policies in a +2°C to +4°C world, Wegener Center for Climate and Global Change, University Graz.
- [22] CEREMA (2015). Impactos potenciales del cambio climático sobre las infraestructuras y sistemas de transporte, sobre sus estándares de diseño, mantenimiento y operación, y la necesidad de proyecciones climáticas detalladas para su adaptación - Plan nacional de adaptación al cambio climático: infraestructuras y sistemas de transporte, acción 1, CEREMA, Francia, 2015.
- [23] Leviakangas, P., Tuominen, A., Molarius, R., Kojo, H. (2011). Extreme weather impacts on transport systems, EWENT project D1, VTT Technical Research Centre of Finland, 2011.
- [24] Leviakangas, P., Saarikivi, P. European Extreme Weather Risk Management - Needs, Opportunities, Costs and Recommendations, EWENT project D6, VTT Technical Research Centre of Finland.
- [25] Banco Mundial, Direction Des Routes du Maroc, Ingerop (2015). Adaptación de las carreteras al riesgo y al cambio climático en Marruecos - Guía simplificada.
- [26] Locquet E., Aldebert, P. (2016). Mejora de la carretera de acceso de Pasakha - Proyecto de conectividad de la carretera SASEC - Bután, Resumen del caso de estudio, Egis.
- [27] Kaundinya, I., Nisancioglu, S., Kammerer, H., Oliva, R. (2016). All-hazard for transport infrastructure, Transportation Research Procedia, vol. 14, p1325-1334.
- [28] CEREMA (2011). Enfoque RESAU<sup>2</sup>: Resiliencia de los actores y redes de emergencia, Cerema, Francia.

- [29] CEREMA (2009). Estrategia operativa - Valle del Ródano en Drôme-Ardèche, fase 1: diagnóstico de tráfico, Cerema, Francia.
- [30] CEREMA (2009). Estrategia operativa - Valle del Ródano en Drôme-Ardèche, fase 2: Escenarios y respuestas Seguridad Civil: Redes estratégicas para la gestión de crisis, CEREMA, Francia.
- [31] CEREMA (2009). Estrategia operativa - Valle del Ródano en Drôme-Ardèche, fase 3: propuestas de orientaciones estratégicas, CEREMA, Francia.
- [32] AUSTROADS (2004), Impacts of Climate Change on Road Infrastructure, AP-R243/04, Sydney, NSW.
- [33] Administración Federal de Carreteras (2017). Evaluación de la vulnerabilidad y marco de adaptación: 3rd Edition, Office of Planning, Environment, & Reality, FHWA-HEP-18-020.
- [34] Agencia de Carreteras (2009). Climate Change Adaptation Strategy and Framework, Reino Unido.
- [35] Williamson, T., Mclean D. (2016). Evaluación de Riesgos de Cambio Climático Proyecto de Extensión de la Autopista Mitchell. Documento de posición, CPD Contractors, W01000-ES-PP-9002, Australia.
- [36] Beecroft, A., Peters, E. (2017). A4: Contabilidad de las consecuencias del cálculo del coste del ciclo de vida y de los riesgos de funcionamiento de las redes en caso de lluvias e inundaciones (2013/14-2015/16). National Asset Centre of Excellence (NACOE) A4, Project No. 010561, Australia.
- [37] Engeset, R. (2013). Servicio Nacional de Alerta de Avalanchas para Noruega: Establecido en 2013, Dirección Noruega de Recursos Hídricos y Energía, Taller Internacional de Ciencia de la Nieve, Grenoble, Chamonix Mont-Blanc, Noruega.
- [38] Dirección de Carreteras de Dinamarca. (2013). Strategy for Adapting to Climate Change, Vejdirektoratet, Dinamarca.
- [39] Hundecha, Y. y Bardossy, A (2004). Modelado del efecto de los cambios en el uso de la tierra sobre la generación de escorrentía de una cuenca hidrográfica a través de la regionalización de parámetros de un modelo de cuenca, J. Hydrol, 292, 281-295.
- [40] Locquet E., Aldebert, P. (2016). Consideración de la elevación del nivel del mar en el diseño del NRL - Isla de la Reunión, Case Study Abstract, Egis.
- [41] Administración de Transporte de Suecia (2014). Estrategia de la Administración de Transporte de Suecia para la Adaptación al Cambio Climático, Suecia.
- [42] Petkovic, G., Humstad T., Dolva, BK. (2008). Analysis at the Nation level of Vulnerability and Adaptation Measures in Norway, Norwegian Public Roads Administration, Norway, n.d.
- [43] Agencia de Carreteras (2008). Informe Anual 2007-2008. Reino Unido, 2008.
- [44] Evans, V., Tsolakis, D., Naudé, C. (2009). Framework to Address the Climate Change Impacts on Road Infrastructure Assets and Operations, Australian Transport Research Forum.
- [45] Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (2017). Brújula climática: Un proceso de gestión de riesgos climáticos propuesto para las agencias de la Commonwealth, CSIRO, Australia.

- [46] Nyman, M (2016). Gestionar el intercambio de conocimientos sobre los impactos inducidos por las condiciones meteorológicas extremas en la infraestructura de transporte terrestre: Caso de estudio de la Administración Sueca de Transporte por Carretera, Estudios de la Universidad de Karlstad, Suecia.
- [47] Agencia de Carreteras (2011). Climate Change Risk Assessment, Reino Unido.
- [48] Tröltzsch, J., Rouillard, J., Tarpey, J., Lago, M., Watkiss, P., Hunt, A. (2016). The economics of climate change adaptation: Perspectivas de los métodos de evaluación económica, ECONADAPT Deliverable 10.2.
- [49] OCDE (2016). Adaptación del transporte al cambio climático y a las condiciones meteorológicas extremas: Implications for Infrastructure Owners and Network Managers, International Transport Forum Research Reports, OECD Publishing, París.
- [50] Oficina de Infraestructura, Transporte y Economía Regional (2014). Overview of Project Appraisal for Land Transport, BITRE, Department of Infrastructure and Regional Development, Canberra, Australia.
- [51] Lazarow, N. (2016). Opciones reales de adaptación al litoral: CoastAdapt, National Climate Change Research Facility, Gold Coast, Australia.
- [52] Dore, M., Burton, I. (2011). The Costs of Adaptation to Climate Change in Canada: Una estimación estratificada por sectores y regiones. Publicación en línea.
- [53] Steininger, K., König, M., Bednar-Friedl, B., Kranzl, L., Loibl, W., Prettenhaler, F. (eds.) (2015). Cambio climático en Austria: The Costs of Inaction, Springer, Berlin.
- [54] Institute of Public Works Engineering Australia (IPWEA) 2017, Climate Change Risk Assessment for Roads and Transport Infrastructure, IPWEA (NSW) Roads and Transport Directorate, Preparado por Jennifer Yap.
- [55] AECOM (2012). Climate Change Vulnerability Assessment Framework for Infrastructure, Policy and Cabinet Division, Chief Minister and Cabinet Director, Canberra, ACT.
- [56] Administración Federal de Carreteras (2016). Programa Piloto de Resiliencia Climática 2013-2015: Outcomes, Lessons Learned and Recommendations, US Department of Transportation, FHWA, julio, Documento FHWA-HEP-16-079.
- [57] Commonwealth de Australia (2015). Declaración de Política de la Estrategia de Resiliencia de Infraestructura Crítica, <https://www.tisn.gov.au/Pages/default.aspx>
- [58] VicRoads (2015). Evaluación del riesgo de cambio climático, Gobierno del Estado de Victoria, <file:///C:/Users/ceaz4618/AppData/Local/Microsoft/Windows/INetCache/IE/YGUOIY35/Climate%20Change%20Adaptation%20Strategy.pdf>
- [59] The Climate Institute 2013 Infrastructure Interdependencies and Business-Level Impacts A new approach to climate risk assessment, Australia <[http://www.climateinstitute.org.au/verve/\\_resources/TCI\\_InfrastructureInterdependenciesReport\\_April2013.pdf](http://www.climateinstitute.org.au/verve/_resources/TCI_InfrastructureInterdependenciesReport_April2013.pdf)>>>.

## 14. GLOSARIO

| <b>Término</b>                 | <b>Definición</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Adaptación</b>              | La adaptación es el ajuste en los sistemas naturales o humanos en respuesta a estímulos climáticos reales o proyectados o a sus efectos, cuyo objetivo es moderar los daños o aprovechar las oportunidades benéficas (Marco de la PIARC, 2015).                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Capacidad de adaptación</b> | La capacidad o el potencial de un sistema para responder con éxito a la variabilidad y el cambio climático, e incluye ajustes tanto en el comportamiento como en los recursos y tecnologías (Marco de la PIARC, 2015).                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Consecuencia</b>            | Resultado de un evento que afecte a los objetivos. Un evento puede tener una serie de consecuencias. Una consecuencia puede ser cierta o incierta y puede tener efectos positivos o negativos en los objetivos (ISO, 2009).                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Activos Críticos</b>        | Los activos críticos son aquellos que son esenciales para satisfacer las necesidades sociales y empresariales de la economía local y nacional (PIARC, Manual de Gestión de Activos, 2017).                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Criticidad</b>              | La relevancia de un elemento o sección de infraestructura para la disponibilidad de un sistema de infraestructura carretera.<br><br>Nota: Basado en la Guía para todos los peligros de la infraestructura de transporte, 2015.                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Exposición</b>              | La presencia de personas, medios de subsistencia, servicios y recursos ambientales, infraestructura o bienes económicos, sociales o culturales en lugares que podrían verse afectados negativamente (Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, IPCC, 2012).                                                                                                                                                                        |
| <b>Frecuencia</b>              | Medición de la probabilidad de un evento expresado como un número de eventos o resultados por unidad de tiempo definida (ISO, 2009).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Posibilidad</b>             | Probabilidad de que algo suceda (ISO, 2009).<br><br>ISO utiliza la palabra "posibilidad" para referirse a la posibilidad de que algo suceda, ya sea definido, medido o determinado objetiva, subjetiva, cualitativa o cuantitativamente, y descrito usando términos generales o matemáticos (como probabilidad o frecuencia).                                                                                                                                                     |
| <b>Mitigación</b>              | Una intervención humana para reducir las fuentes o mejorar los sumideros de gases de efecto invernadero (GEI).<br><br>Nota: Basado en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC: Cambio climático 2007                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Probabilidad</b>            | La probabilidad de impacto se refiere a la probabilidad de que se produzca un impacto dentro de un plazo determinado (Marco de la PIARC, 2015). Medida de la probabilidad de ocurrencia expresada como un número entre 0 y 1, donde 0 es la imposibilidad y 1 es la certeza absoluta (ISO, 2009).                                                                                                                                                                                 |
| <b>Resiliencia</b>             | La capacidad de prepararse y planificar para, absorber, recuperarse de, o adaptarse exitosamente a eventos adversos reales o potenciales.<br><br>Nota: La definición desarrollada por el comité de estudio se basa en la literatura existente y es consistente con la comunidad internacional de políticas de desastres (UNISDR, 2011), las definiciones de las agencias gubernamentales de los EE.UU. (SDR, 2005; DHS Risk Steering Committee, 2008; PPD-8, 2011), y NRC (2011). |
| <b>Riesgo</b>                  | Efecto de la incertidumbre sobre los objetivos. El riesgo a menudo se caracteriza por la referencia a eventos potenciales, consecuencias, o una                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

|                               |                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                               | combinación de estos y cómo pueden afectar el logro de los objetivos. El riesgo se expresa a menudo en términos de una combinación de las consecuencias de un evento o un cambio en las circunstancias, y la probabilidad de ocurrencia asociada (ISO, 2009). |
| <b>Análisis de riesgos</b>    | Proceso para comprender la naturaleza del riesgo y determinar el nivel de riesgo. El análisis de riesgos proporciona la base para la evaluación de riesgos y la toma de decisiones sobre el tratamiento de riesgos (ISO, 2009).                               |
| <b>Evaluación de riesgos</b>  | Proceso general de identificación, análisis y evaluación de riesgos (ISO, 2009).                                                                                                                                                                              |
| <b>Valoración de riesgos</b>  | Proceso de comparación de los resultados del análisis de riesgos con los criterios de riesgo para determinar si el nivel de riesgo es aceptable o tolerable (ISO, 2009).                                                                                      |
| <b>Gestión de riesgos</b>     | Actividades coordinadas para dirigir y controlar una organización con respecto al riesgo (ISO, 2009).                                                                                                                                                         |
| <b>Tratamiento del riesgo</b> | Proceso de desarrollo, selección e implementación de controles (ISO, 2009).                                                                                                                                                                                   |
| <b>Sensibilidad</b>           | El grado en que un sistema se ve afectado, de manera adversa o beneficiosa, por los estímulos relacionados con el clima (Marco de la PIARC, 2015).                                                                                                            |
| <b>Vulnerabilidad</b>         | El grado en que un sistema es susceptible o incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los extremos (Marco de la PIARC, 2015).                                                               |



*Derechos de autor por la Asociación Mundial de Carreteras. Todos los derechos reservados.*

*Asociación Mundial de Carreteras (PIARC)*

*La Grande Arche, Paroi Sud, 5e étage, F-92055 La Défense cedex*

*ISBN 978-2-84060-602-4*