



*Certificación ISO 9001:2015 ‡*

---

---

# PANORAMA INTERNACIONAL DE LA ADAPTACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Juan Fernando Mendoza Sánchez  
Omar Alejandro Marcos Palomares

**Publicación Técnica No. 488**  
**Sanfandila, Qro, 2017**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Panorama Internacional de la Adaptación de la  
Infraestructura Carretera ante el Cambio  
Climático**

**Publicación Técnica No. 488**  
**Sanfandila, Qro, 2017**

---



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por el MC Juan Fernando Mendoza Sánchez y el Ing. Omar Alejandro Marcos Palomares, investigadores del Grupo de Medio Ambiente.

Se agradece la colaboración del Ing. Roberto Aguerrebere Salido por sus comentarios y a la Alianza Mexicana-Alemana de Cambio Climático (GIZ) por su interés en la realización del presente estudio.

# Contenido

---

Resumen		iii
Abstract		iv
Resumen	Ejecutivo	v
Introducción		1
Capítulo 1.	Generalidades	5
Capítulo 2.	Adaptación al cambio climático	21
Capítulo 3.	Políticas nacionales para la adaptación al cambio climático	33
Capítulo 4.	Metodologías para la adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera	50
Capítulo 5.	El estado del arte sobre las mejores prácticas de adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera	73
Capítulo 6.	Conclusiones	83
Bibliografía		87
Anexos:		
	Terminología	93

# Resumen

---

La presente investigación recopila y resume las mejores prácticas y el conocimiento disponible a nivel internacional sobre la adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera.

El estado del arte de la adaptación al cambio climático se basa en investigación bibliográfica, la cual sintetiza los efectos negativos que los fenómenos climáticos tienen sobre la infraestructura del transporte y sus operaciones, para identificar las vulnerabilidades y oportunidades de adaptación e incrementar su resiliencia ante futuras consecuencias.

Otro aspecto a considerar en esta investigación es la identificación de las políticas vigentes nacionales que encauzan la tarea de adaptación, pero también las barreras que actualmente limitan esta tarea y la identificación de los grupos de interés que, actualmente en México, colaboran en los temas de adaptación al cambio climático.

La investigación compila también, en el contexto internacional, las metodologías y herramientas disponibles para encarar la adaptación de la infraestructura carretera, basados en estudios de caso, las cuales podrán ayudar a las autoridades de carretera en la comprensión de los efectos potenciales del cambio climático.

Finalmente, el presente trabajo recopila las mejores prácticas, políticas y estrategias que los diferentes países han implementado e identificado como acciones para la adaptación de la infraestructura carretera, las cuales les permitirá hacer frente a los retos actuales de los impactos del cambio climático.

# Abstract

---

This research compiles and summarizes the best practices and internationally available knowledge on the adaptation to climate change of road infrastructure.

The state of the art of adapting to climate change is based on bibliographical research, which synthesizes the negative effects that climatic phenomena can have on transport infrastructure and its operations, to identify vulnerabilities and opportunities for adaptation and to increase their resilience to future consequences.

Another aspect to be considered in this research is the identification of the current national policies that guide the adaptation task, but also the barriers that currently limit this task, and the identification of the interest groups that currently collaborate in Mexico in themes of adaptation to the climate change.

The research also compiles in the international context the methodologies and tools available to address the road infrastructure adaptation, based on case studies, which can assist road authorities in understanding the potential effects of climate change.

Finally, this paper compiles the best practices, policies and strategies that different countries have implemented and identified as actions for the adaptation of road infrastructure, which will enable them to respond to the current challenges of the impacts of climate change.

# Resumen ejecutivo

---

En las últimas décadas, los cambios en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos. El aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos ha llevado a generar una preocupación internacional para adaptarse y con ello reducir la severidad de los impactos del cambio climático.

Cada región en el país ha experimentado en los últimos años diferentes impactos climáticos, tales como fenómenos hidrometeorológicos extremos, sequías, olas de calor, nevadas, etc., cuyas consecuencias han sido en varios de los casos catastróficas.

Utilizando los resultados de los modelos económicos formales, Stern (2006), estima que si no se actúa, los costos y riesgos globales del cambio climático equivaldrán a perder, al menos, el 5% del PIB mundial cada año, actualmente y en el futuro. Si se tiene en cuenta además una gama más amplia de riesgos e impactos, las estimaciones de daño podrían elevarse hasta un 20% del PIB o más.

Los diferentes fenómenos climáticos y sus consecuencias afectan el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de la infraestructura y los sistemas de transporte. Un clima cambiante plantea preguntas críticas respecto a cómo las alteraciones en la temperatura, las precipitaciones, las tormentas y otros aspectos del clima están afectando los activos carreteros que conforman los sistemas de transporte y que lo seguirán impactando en el futuro (PIARC, 2015).

Para mitigar estos efectos adversos sobre los sistemas y los ecosistemas es importante adaptarse. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1997) reconoce la necesidad de adaptarse a los impactos previsibles de la variabilidad y el cambio climático.

La adaptación es un concepto que se entiende como la acción y el efecto de adaptar o adaptarse, un verbo que hace referencia a la acomodación o ajuste de algo respecto a otra situación, de esta manera, la adaptación en el contexto del cambio climático se puede definir como la habilidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad del clima y sus extremos) para contener daños posibles, aprovechar oportunidades o enfrentarse con capacidad de resiliencia a las futuras consecuencias. De esta manera se busca que la adaptación al cambio climático sea el mecanismo para reducir la vulnerabilidad de la infraestructura estratégica en México.

Las medidas de adaptación son aquellas respuestas o acciones adoptadas para mejorar la resiliencia de los sistemas vulnerables, reducir los daños a los sistemas humanos y naturales ante el cambio climático y la variabilidad climática.

Este estudio muestra un panorama sobre la adaptación al cambio climático desde una perspectiva internacional, con especial énfasis en la infraestructura carretera.

En algunos países, la adaptación se ha incorporado en algunos procesos de planificación, aunque la respuesta es limitada ya que, normalmente, se integran a los programas del manejo de desastres o riesgos, la gestión de los recursos hídricos, sistemas de alerta temprana, etc. Sin embargo, se requiere un mayor esfuerzo para diseminar el conocimiento, capacitar a la sociedad y a los profesionales, realizar ajustes e implementar más acciones de adaptación, asegurando incrementar los co-beneficios de adaptarse.

El proceso de adaptación no puede ser estático, sino que debe ser un proceso iterativo que permita evaluar las incertidumbres actuales del clima y que, a medida que se adquiere más conocimiento, se podrá ser más asertivo en el diseño de las medidas de adaptación.

Actualmente las acciones de adaptación son emprendidas por los gobiernos, de esta manera las decisiones de adaptación tienen un carácter corporativo y planificado del gobierno local. Al tomar estas decisiones de adaptación, las autoridades aplican herramientas tradicionales de apoyo para la toma de decisiones, tales como análisis de costo-beneficio, análisis de costo-efectividad y análisis multicriterio (OCDE, 2008).

De la misma manera que el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, en México se ha abordado el sector transporte con mayor énfasis en la mitigación, de los cuales se han desarrollado un importante número de estudios e implementado diversas acciones; sin embargo, los trabajos realizados sobre impactos, vulnerabilidades y acciones de adaptación en los sistemas de transporte son mínimos.

De acuerdo con la Comisión Intersecretarial el Cambio Climático (2012), es importante que se integren criterios de adaptación en los instrumentos de planeación del desarrollo económico; por ejemplo, que el diseño de la infraestructura que se va a construir, en particular aquella con una vida de largo plazo, parta de información sobre impactos y adaptación al cambio climático. Es importante orientar las tendencias de desarrollo de infraestructura hacia esquemas de eco-eficiencia y sustentabilidad.

En México, en materia de adaptación para la infraestructura de transporte, considerada como estratégica para el país, han sido mínimos, incluyendo las metas internacionales convenidas en la Conferencia de las Partes celebrada en París en 2015 (COP 21). Existen estimaciones nacionales del costo económico que tendría el cambio climático si no se adoptaran medidas de adaptación y mitigación. De acuerdo con Galindo (2009), para el año 2050, el costo representaría aproximadamente 3.2% del PIB.

En la Administración Pública Federal (APF) en México, en los últimos años se han implementado una serie de programas que han coadyuvado a avanzar en los

temas de adaptación al cambio climático, tales como: Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC), Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN), Fondo para la Atención de Emergencias (FONDEN), Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT-CT), Estrategia Nacional de Mitigación del Riesgo por Inestabilidad de Laderas, Boletines meteorológicos marítimos (Derrotero Meteorológico), Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Guía para la atención de emergencias en carreteras y puentes de la SCT, entre otros.

La adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera se ha abordado de múltiples formas en diversos países, de tal manera que adoptar y extraer las mejores prácticas sobre las metodologías, herramientas o métodos utilizados para la adaptación puede resultar complejo.

El presente trabajo recopiló y clasificó las diferentes metodologías y herramientas que se han utilizado para la adaptación de la infraestructura de transporte en el mundo, clasificándolas de acuerdo al enfoque en el que abordan la adaptación.

El primer grupo denominado “iniciativas para la adaptación al cambio climático”, incluye las políticas nacionales que diversos países han implementado, donde el transporte y su infraestructura han sido identificados como prioridad y, a través de diversas estrategias y acciones, pretenden aumentar la resiliencia de los sistemas de transporte.

Un segundo grupo de metodologías, que se están aplicando a nivel país, es el uso de técnicas tales como la superposición de mapas, donde los mapas pueden ser de sitios de riesgos de fenómenos climáticos basados en registros históricos o también en mapas que incluyen pronósticos climáticos de temperatura o precipitación, que al superponer las capas sobre la red de carreteras se pueden identificar los activos que podrían estar vulnerables ante los diferentes fenómenos climáticos. Esta metodología es útil para asegurar la resiliencia de la infraestructura si se aplicaran acciones de adaptación en un corto plazo con base en registros históricos y, en un largo plazo, si se utilizan proyecciones de clima bajo los diferentes escenarios del IPCC a pesar de las incertidumbres existentes. Éste grupo se denominó “metodologías basadas en herramientas”.

Un tercer grupo de metodologías para abordar la adaptación de infraestructura es a través procesos, donde se guía mediante etapas a los administradores de carreteras para que puedan evaluar la red carretera y con ello identificar la vulnerabilidad de sus activos, evaluando su grado de exposición y sensibilidad, así como la probabilidad y severidad del impacto para que, en la etapa final, se definan las estrategias de adaptación y se prioricen las respuestas de adaptación. Este grupo se denominó “metodologías para tomadores de decisiones”.

El cuarto grupo de metodologías es aquel que se apoya en diferentes técnicas tales como grupos ad-hoc, redes causa-efecto, listas de verificación, entre otros, mediante las cuales los ingenieros de carreteras identifican, bajo criterio experto,

los riesgos probables que el cambio climático tendrá sobre los activos carreteros. El *expertise* de los ingenieros de carreteras es básico para la identificación de vulnerabilidades, pero estos deben capacitarse en temas de cambio climático para que, aplicando diversas herramientas, puedan ser asertivos en la identificación de los elementos en riesgo en el activo carretero. Este grupo se denominó “metodologías basadas en criterio experto”.

Una de las mayores complicaciones para adaptarse al cambio climático es la incertidumbre de los escenarios climáticos, la cual dificulta identificar los impactos futuros del clima a nivel local o regional. Existen casos particulares donde se ha podido ser más asertivos en los pronósticos; sin embargo, aun la cuantificación económica de los efectos es complicada de evaluar.

Estas incertidumbres complican la estandarización de las medidas de adaptación, por lo que cada acción adaptativa deberá tener cierto grado de flexibilidad para continuar adaptándose a condiciones futuras del clima no previstas inicialmente. Dicho en otros términos, esto significa que tanto la infraestructura construida como la nueva deberán ser diseñadas de tal manera que permitan futuras modificaciones que podrían requerirse en el futuro.

El presente trabajo resume la práctica internacional de las acciones de adaptación en el sector carretero, clasificadas por etapa del proyecto, las cuales en el futuro podrán ser sub-clasificadas por evento climático o tipo de impacto. Los resultados muestran un panorama internacional de buenas prácticas, las cuales servirán para los tomadores de decisiones a elegir acciones prácticas, fáciles de implementar, para comenzar el proceso de adaptación de los sistemas carreteros en México.

Las conclusiones hacen referencia a la necesidad de contar con elementos para concientizar a las autoridades de carreteras para aumentar los esfuerzos de adaptación e incrementar la resiliencia de la red, por lo que se requieren esfuerzos adicionales que den continuidad al presente trabajo a fin de contar con metodologías adaptadas a México y fáciles de utilizar. Por otro lado, es importante conocer los impactos climáticos que están sufriendo actualmente las carreteras en el país para que, con dicha información, se puedan justificar inversiones para la adaptación que permitan darle robustez a los elementos críticos de la infraestructura carretera.

# Introducción

---

En las últimas décadas, los cambios en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos. El aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos ha llevado a generar una preocupación internacional para adaptarse y con ello reducir la severidad de los impactos del cambio climático.

Cada región en el país ha experimentado diferentes impactos climáticos en su tipo, tales como fenómenos hidrometeorológicos extremos, sequías, olas de calor, nevadas, etc. Los países/regiones más pobres son los más vulnerables al cambio climático.

Para mitigar estos efectos adversos sobre los sistemas y los ecosistemas es importante adaptarse. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) reconoce la necesidad de adaptarse a los impactos previsibles de la variabilidad y el cambio climático.

Para adaptarse la sociedad y sus actores involucrados en cada región o en cada sector pueden definir cuáles son los riesgos y oportunidades que les preocupan, esto dependerá en gran medida de la percepción que tienen de los riesgos que plantea el cambio climático.

Si la sociedad decide adaptarse, deben considerarse cuestiones importantes para asegurar que las respuestas adaptativas sean efectivas.

Este estudio busca dar a conocer un panorama internacional sobre la adaptación al cambio climático, con un especial enfoque en la infraestructura carretera. Adaptación es un concepto que se entiende como la acción y el efecto de adaptar o adaptarse, un verbo que hace referencia a la acomodación o ajuste de algo respecto a otra situación.

Las medidas de adaptación son aquellas respuestas o acciones adoptadas para mejorar la resiliencia de los sistemas vulnerables, reducir los daños a los sistemas humanos y naturales ante el cambio climático y la variabilidad climática.

Generalizar los efectos del clima y determinar una respuesta de adaptación es difícil, ya que los impactos del cambio climático varían por región del país y por modo de transporte. Sin embargo, se requieren ajustes adaptativos en prácticas, procesos o estructuras, para reducir la sensibilidad de los sistemas a los cambios en las condiciones climáticas o para explotar nuevas oportunidades. De esta manera, se requiere profundizar en el conocimiento existente y la práctica actual del impacto del cambio climático y las respuestas de adaptación, incluyendo el panorama nacional, en términos de políticas y acciones existentes.

El presente trabajo resume en el capítulo 1 las generalidades de la adaptación al cambio climático, comenzado en la identificación de los efectos del cambio climático y cómo estos se han materializado en los últimos años en impactos a la infraestructura carretera. Los impactos potenciales del cambio climático se catalogan como riesgos, cuyo concepto se describe en este capítulo, así como otros, relacionados con la vulnerabilidad, la adaptación y la resiliencia.

El capítulo 2 profundiza en la adaptación al cambio climático, donde se explica que es un proceso iterativo para permitir modificar la infraestructura en tanto se adquiere más conocimiento sobre las incertidumbres actuales del clima. Se exponen algunos principios que, de acuerdo a la literatura estudiada, podría ayudar a implementar una adaptación efectiva. La atención de los riesgos del cambio climático es esencial dentro del proceso de adaptación al cambio climático, por lo que se estudiaron los enfoques que actualmente se han estado utilizando y, como estos pueden integrarse en la gestión de riesgos y la adaptación al cambio climático para lograr un desarrollo resiliente al clima.

Los impactos del cambio climático se convierten en pérdidas significativas para los países y el aseguramiento de la de la infraestructura para hacerla resiliente al clima, por eso en el capítulo 2 también se incluye una revisión de las implicaciones económicas en el proceso de adaptación. Se enlistan las barreras para la adopción de medidas para comprender y adaptarse al cambio climático que se identificaron en la revisión bibliográfica, así como la identificación de los actores involucrados en la adaptación al cambio climático.

Para entender el avance nacional actual sobre la adaptación al cambio climático, en el capítulo 3 se hace una descripción de las políticas nacionales sobre cambio climático, partiendo de los instrumentos actuales y su alineación al contexto internacional, así como los arreglos institucionales que han propiciado iniciar procesos para la adaptación en el país.

Adicionalmente, en el capítulo 3 se documenta el costo de la adaptación para México y los instrumentos de política de la APF vinculados con la adaptación al cambio climático, tales como el Fondo para la Atención de Emergencias (FONDEN) y el Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN), y programas como el Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT-CT) o la Guía para la atención de emergencias en carreteras y puentes de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

La adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera se ha abordado de múltiples formas en diversos países, por lo que el capítulo 4 compila las metodologías para la adaptación de la infraestructura carretera. Existen principalmente dos enfoque metodológicos *top-down* y *bottom-up*, los cuales se explican en este capítulo, pero también se evalúan las perspectivas mediante las cuales se aborda la adaptación, clasificándolas en: iniciativas para la adaptación al cambio climático, metodologías basadas en herramientas, metodologías para tomadores de decisiones, metodologías basadas en criterio experto, etc.

La adaptación incluye cambios en las políticas y prácticas para hacer frente a las amenazas y riesgos del cambio climático. En el contexto del transporte se tienen dos objetivos principales, proteger a las personas y el asegurar la integridad física de su infraestructura.

Este capítulo 5 resume la práctica internacional de las acciones de adaptación en el sector carretero, clasificadas por etapa del proyecto, las cuales en el futuro podrán ser sub-clasificadas por evento climático o tipo de impacto.

La adaptación se ha caracterizado por la toma de decisiones bajo incertidumbres, asociadas con la ciencia del clima y sus tendencias, por lo que su enfoque ha sido en la mayoría de los casos pragmático, participativo y flexible, mediante los cuales se han construido escenarios para evaluar los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación.

Las conclusiones y recomendaciones de este documento se basan en una revisión de la literatura de investigación y la experiencia directa de los autores sobre impactos del cambio climático y los trabajo sobre adaptación realizados.



# 1 Generalidades

---

En las últimas décadas, los cambios en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y a lo largo de los océanos. La evidencia de los impactos del cambio climático es más sólida y completa para los sistemas naturales. Algunos impactos en los sistemas humanos también han sido atribuidos al cambio climático.

De acuerdo al último reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (2014) (IPCC, por sus siglas en inglés), en muchas regiones los cambios en la precipitación y el derretimiento del hielo y nieve están alterando los sistemas hidrológicos, afectando los recursos hídricos en cantidad y calidad. Los glaciares continúan reduciéndose en casi todo el mundo debido al cambio climático, afectando los escurrimientos y los recursos hídricos aguas abajo. El cambio climático está causando el calentamiento y descongelación de la capa de permafrost (permacongelamiento) en las regiones de latitud alta o de gran altitud.

Muchas especies animales, terrestres o marinas han cambiado sus áreas de distribución geográfica, sus actividades estacionales, los patrones de migración, la abundancia y las interacciones entre especies en respuesta al cambio climático. Aunque solo pocas extinciones de especies se han atribuido, hasta el momento, al cambio climático.

Para otros sectores el impacto del cambio climático también ha demostrado su efecto, tales como la agricultura (pérdida de cosechas, menos producción en algunas regiones, etc.), la salud (mortalidad relacionada con las ondas de calor o frío extremo, aumento de la transmisión de enfermedades, etc.), entre otros.

Los impactos de los eventos extremos climáticos recientes, como las olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones y los incendios forestales, revelan una gran vulnerabilidad y grado de exposición a la variabilidad climática actual, de algunos ecosistemas y muchos sistemas humanos.

Los impactos relacionados con el clima incluyen la alteración de los ecosistemas, la interrupción de la producción de alimentos y el suministro de agua, daños a la infraestructura y los asentamientos humanos, la morbilidad y la mortalidad de personas y especies, así como consecuencias para la salud mental y el bienestar humano. Para los países en todos los niveles de desarrollo, estos impactos son compatibles con una significativa falta de preparación para hacer frente a la variabilidad climática actual en algunos sectores.

## 1.1 Efectos del cambio climático en la tierra

En los últimos años, el planeta tierra ha presentado cambios importantes en la temperatura, los registros indican que ésta se ha incrementado provocando un fenómeno denominado calentamiento global.

El origen del calentamiento global está asociado a una mayor acumulación de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), los cuales atrapan una mayor cantidad de la radiación solar, calentando la corteza terrestre e incrementando la temperatura de la tierra.

El efecto más importante que el calentamiento global ha generado sobre nuestro planeta es el cambio climático, cuyas consecuencias han sido en varios de los casos catastróficas. El cambio climático son variaciones de las diferentes condiciones meteorológicas en espacio temporales de años y décadas, tales como: precipitación, temperatura, etc.

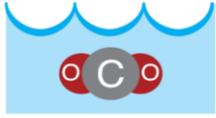
El calentamiento global, también ha coadyuvado a la variabilidad climática de la tierra. La variabilidad climática es una medida del rango en que los elementos climáticos, tales como temperatura o precipitación, varían de un año a otro. De acuerdo a series estadísticas (mensuales o anuales) se estiman los límites máximos y mínimos dentro de los cuales fluctúan los parámetros climatológicos. Los valores que se presentan fuera de este límite se consideran anómalos.

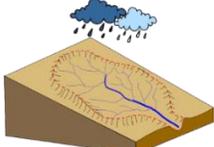
Como resultado del cambio climático y de la variabilidad climática, fenómenos como las sequías, las inundaciones, deshielos, huracanes, etcétera, han impactado negativamente a la agricultura, los bosques, las playas y a los sistemas de energía y de transporte.

A continuación se describen a algunos de los fenómenos climáticos que se han presentado frecuentemente en México.

**Tabla 1.1 Descripción de Fenómenos Climáticos.**

Pictograma	Fenómeno climático	Descripción del fenómeno climático
	Aumento de la temperatura terrestre	El aumento de la temperatura de la atmósfera se refleja en el calentamiento de los océanos, el incremento del nivel del mar, el derretimiento de los glaciares, el desplazamiento del hielo marino en el Ártico y la disminución de capa de nieve en el hemisferio norte.
	Ciclones tropicales y huracanes	Los conceptos de ciclón tropical, Huracán y Tifón, aunque diferentes, describen el mismo tipo de fenómeno. Un ciclón tropical es un sistema de tormenta no frontal caracterizado por un centro de baja presión, bandas de lluvias en espiral y fuertes vientos.

	Aumento de la temperatura y acidificación de los océanos	La acidificación de los océanos implica que éstos han captado una mayor cantidad de CO <sub>2</sub> , modificando el PH del agua del océano, entre otras variables.
	Lluvias y tormentas intensas	La lluvia es un fenómeno atmosférico de tipo hidrometeorológico que se inicia con la condensación del vapor de agua contenido en las nubes. Una tormenta es un fenómeno caracterizado por la coexistencia próxima de dos o más masas de aire de diferentes temperaturas.
	Aumento del nivel del mar	El aumento del nivel del mar se debe a la dilatación térmica (calentamiento del agua) y al deshielo de zonas heladas y glaciares.
	Sequía	La sequía es una anomalía climatológica transitoria en la que la disponibilidad de agua se sitúa por debajo de lo habitual de un área geográfica. Esta falta de lluvias durante un período prolongado de tiempo produce sequedad en los campos y escasez de agua.
	Olas de calor	Una ola de calor es un periodo prolongado de tiempo excesivamente cálido, que puede ser también excesivamente húmedo.
	Precipitación intensa	La precipitación se mide en milímetros de agua, o litros caídos por unidad de superficie (m <sup>2</sup> ), es decir, la altura de la lámina de agua recogida en una superficie plana es medida en mm. La intensidad se define como la cantidad de agua que cae por unidad de tiempo en un lugar determinado.
	Nevadas, heladas y granizadas	En el ámbito de la meteorología se conoce como nevada/granizada al fenómeno que hace que se precipite nieve/granizo en lugar de lluvia. El tamaño del cristal de hielo define el tipo de precipitación (nevada o granizada). La helada es un fenómeno meteorológico que consiste en un descenso de la temperatura ambiente a niveles inferiores al punto de congelación del agua y hace que el agua o el vapor que está en el aire se congelen.
	Inundaciones	Una inundación se produce cuando una cantidad determinada de agua ocupa un lugar que normalmente se encuentra libre de ésta.
	Marejadas e inundaciones costeras	La marejada es principalmente producto de los vientos (producto de un ciclón) en altura que empujan la superficie oceánica. El viento hace que el agua se eleve por encima del nivel del mar normal.

	<p>Aluviones</p>	<p>Los aluviones corresponden a un tipo de movimiento brusco de tierra mezclado con agua. Se caracterizan por sus flujos rápidos y violentos capaces de arrastrar rocas y otros materiales que descienden por una quebrada o lecho de río.</p>
	<p>Deslizamientos</p>	<p>Un deslizamiento es un tipo de corrimiento o movimiento de masa de tierra, provocado por la inestabilidad de un talud.</p>
	<p>Avenida torrencial</p>	<p>Una avenida torrencial (de un río, arroyo, etc.) es la elevación del nivel de un flujo de agua significativamente mayor que su nivel medio.</p>
	<p>Incendios</p>	<p>Un incendio es una ocurrencia de fuego no controlada que puede afectar o abrasar algo que no está destinado a quemarse. Puede afectar a estructuras y a seres vivos.</p>
	<p>Vendaval</p>	<p>Viento extremadamente fuerte y violento.</p>
	<p>Onda fría</p>	<p>Una onda fría es un periodo prolongado de tiempo excesivamente frío, que puede ser también excesivamente seco, y puede generar lluvias, vientos fuertes, agua nieve, entre otros efectos, que afectan mas las zonas altas.</p>

Fuente: Elaboración propia, con imágenes de diversas fuentes incluidas en la bibliografía.

Aunque algunos fenómenos climáticos pudieran ser en realidad una consecuencia directa de otro, por ejemplo, una lluvia intensa puede generar inundaciones, también puede aumentar el caudal en las cuencas hidrológicas generando avenidas torrenciales, así como saturar el suelo y provocar deslizamientos. Sin embargo, se definió separar cada uno de ellos para el presente trabajo a fin de analizar los impactos por separado de cada fenómeno en particular. Es importante mencionar que la lista no es exhaustiva, por lo que se pudieron omitir fenómenos que impactan en menor escala a la infraestructura carretera y no fueron identificados, o cuyo impacto es más significativo para otro sector diferente al de transportes.

## **1.2 Impactos del cambio climático en la infraestructura carretera**

Los diferentes fenómenos climáticos y sus consecuencias afectan el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de la infraestructura y los sistemas de transporte. Un clima cambiante plantea preguntas críticas respecto a cómo las alteraciones en la temperatura, las precipitaciones, las tormentas y otros aspectos del clima están afectando los activos carreteros que conforman los sistemas de transporte y que lo seguirán impactando en el futuro.

Para los tomadores de decisiones es importante conocer y evaluar los daños potenciales que estresan los sistemas viales debido al impacto del clima, de esta manera se puede conocer la vulnerabilidad del sistema y los factores inherentes a dicha vulnerabilidad, así como el grado de exposición que tendrá la infraestructura al estar en contacto con las nuevas condiciones climáticas y el riesgo en términos de probabilidad que la infraestructura falle.

Los posibles impactos climáticos permiten describir cómo los efectos del clima pueden afectar el sistema de carreteras a través de su grado de exposición y sensibilidad actual del sistema o de un futuro probable, determinando su vulnerabilidad, su capacidad de adaptación y su criticidad.

Los métodos para determinar los impactos se han basado, principalmente, en la extrapolación de experiencias de otros países. Muchos de los riesgos del cambio climático provienen de una mayor exposición al clima extremo y de la duración del evento en el tiempo.

A continuación se describen alguno de los efectos del clima que se tienen sobre las carreteras.

### **1.2.1 Incremento de tormentas y de la precipitación**

El aumento de la precipitación suele causar interrupciones en las carreteras principalmente debido a las inundaciones, mientras que las tormentas y los huracanes de forma más repentina y severa dañan la infraestructura carretera.

Algunos de los impactos que se tienen sobre la infraestructura y su operación son los siguientes:

- Interrupciones o retrasos del tránsito por el clima, debido a una precipitación excesiva que obligue a bajar velocidades de operación o detenerse, así como una visibilidad inadecuada de los dispositivos para el control del tránsito, accidentes vehiculares, etc.
- Inundación de las carreteras.

- Deslizamiento y deslaves de material de los taludes y terraplenes por una alta penetración de agua.
- Obras de drenaje insuficiente, debido a un incremento del gasto por precipitaciones excesivas y de larga duración.
- Aumento de la humedad del suelo que pueden poner en riesgo la integridad estructural de los pavimentos, puentes, alcantarillas, etc.
- Incremento de escombros provenientes de taludes, de la vegetación o sedimentos de las escorrentías superficiales debido a su erosión.

## **1.2.2 Vendavales o vientos fuertes**

Las tormentas suelen estar acompañadas de vientos fuertes que provocan daños severos en la infraestructura vial y principalmente para su operación.

Algunos de los impactos de los vientos fuertes:

- Caída de árboles, postes de energía eléctrica y anuncios publicitarios sobre la calzada del camino.
- Inestabilidad de los vehículos sobre las carreteras y los puentes.
- Incremento de la erosión de taludes y terraplenes, provocando acarreo de escombros y basura sobre la superficie de rodamiento.
- Pérdida de señalamiento vertical bajo y elevado en las carreteras, así como el daño a dispositivos para el control de tránsito que requieren suministro eléctrico (tales como los semáforos).
- Daños estructurales a elementos de los puentes.

## **1.2.3 Alta presencia de agua y su acumulamiento**

Las precipitaciones excesivas y las tormentas traen consigo daños adicionales a la infraestructura, principalmente por la cantidad y el tiempo de acumulación. Algunos efectos adicionales son:

- Cambios en los patrones superficiales de los escurrimientos que requieren reubicación de las obras de drenaje o la implementación de obras adicionales.
- Mayor presencia de agua en la superficie de rodadura, por lo que el bombeo y las alcantarillas resultan insuficientes para desalojar el agua en menor tiempo.
- Inestabilidad de las estructuras por aumento de los flujos de agua.
- El agua estancada puede tener efectos adversos sobre las capas de base de la carretera.
- El aumento de los caudales pico podría afectar las tasas de socavación e influir en el requisito de tamaño para los puentes y alcantarillas, tales como el periodo de retorno.

- Los daños causados por la fuerza del agua y el daño debido a colisiones con desechos.
- Erosión de las terracerías en caminos no pavimentados.
- Inundaciones en pasos a desnivel inferiores y túneles carreteros.

### **1.2.4 Sequía y déficit de agua**

La condiciones de sequía y falta de agua también provoca impactos a la infraestructura carretera y a su operación. Algunos impactos que se provocan a las carreteras son:

- La falta de agua hará necesario mejoras en los procedimientos constructivos ya que se requerirá el uso de materiales secos para la construcción de las carreteras.
- Disminución de la humedad en la orilla del camino por lo que no se podrá mantener la cubierta vegetal adecuada, generando erosión y deslizamientos de material, provocando además cambios en el paisaje.
- Incremento de la probabilidad de tener incendios forestales, provocando el cierre de carreteras debido a la amenaza de incendio o de visibilidad reducida
- Las áreas deforestadas por los incendios forestales reducen la capacidad de absorción del suelo e incrementan los escurrimientos superficiales impactando las obras de drenaje.
- Degradación de las capas de cimentación por pérdida de humedad.
- Generación de polvo en las sequías en los caminos no pavimentados.
- Mayor presencia de tolveneras que limiten la visibilidad al conductor por los polvos.

### **1.2.5 Altas temperaturas y olas de calor**

El aumento en la frecuencia y severidad de temperaturas extremadamente altas pueden conducir a un deterioro del pavimento y la formación de surcos. Estos impactos suelen ser lentos y se pueden corregir mediante mantenimiento rutinario, por lo que se le dan preferencia a los efectos que producen impactos súbitos a la infraestructura; sin embargo, son efectos del cambio climático que están impactando las carreteras.

Impactos mayores se presentan cuando las altas temperaturas se presentan y la duración de los periodos de mucho calor se prolonga (olas de calor). Las temperaturas extremas y sus variaciones pueden causar daños a la estructura del pavimento, implicando retos importantes de mantenimiento.

Los principales efectos son los siguientes:

- Aumento de la expansión térmica en las juntas de pavimentos de concreto o de puentes, que provocan estrés en la integridad de la estructura.
- Daños en el pavimento, particularmente en la carpeta asfáltica, tales como: surcos, depresiones, canalillos, exudación de asfalto, etc. Los cuales requerirán un mayor mantenimiento correctivo.
- Degradación del asfalto que repercute en su pérdida en plazos más cortos.
- Limitación en las horas de trabajo durante el periodo diurno para la construcción y mantenimiento de carreteras.

En la operación, implicar afectaciones a los vehículos por el sobrecalentamiento y un mayor desgaste de neumáticos.

Los impactos del cambio climático sobre la infraestructura carretera implican mayores costos para el mantenimiento y reparación de los activos carreteros de la red de transporte.

### **1.3 Riesgo**

El cambio climático es un problema a resolver dentro de la gestión de riesgos (NAS, 2008), lo cual significa atender un mayor número de eventos que pudieran tener una baja probabilidad de ocurrencia pero, si llegan a materializarse los impactos, pueden resultar muy severos y catastróficos.

Un riesgo es la posibilidad de que un evento sea inducido o exacerbado significativamente por el cambio climático, el cual tiene un impacto en algo de valor para la comunidad presente y/o futura. El riesgo se mide en términos de consecuencia y probabilidad (NZG, 2008).

Pensar en riesgos significa que las medidas de adaptación deben ser abordadas con análisis costo/beneficio, para estimar la sensibilidad del costo de la medida de adaptación y atender los diversos riesgos asociados a fenómenos climáticos.

El riesgo es sufrido por la sociedad en su conjunto, con diversos niveles de daños y pérdidas. Es la sociedad quien difunde de manera amplia el riesgo, sin embargo, quien asume los riesgos generalmente son los gobiernos.

Las siguientes direcciones de investigación pueden ayudar a integrar en términos de riesgo a la vulnerabilidad, los impactos y la adaptación:

- Analizar los impactos y los enfoques de adaptación en términos de riesgo, tanto a corto como a largo plazo, para los grupos sociales y locales.
- Preguntar en qué casos las comunidades entienden sus riesgos o se perciben como capaces de reducir el riesgo.

- Preguntar en qué casos la reducción acumulada de los riesgos a pequeña escala aumenta o disminuye la vulnerabilidad a eventos más significativos.
- Proporcionar información clara sobre los riesgos como insumo para las discusiones costo-beneficio.

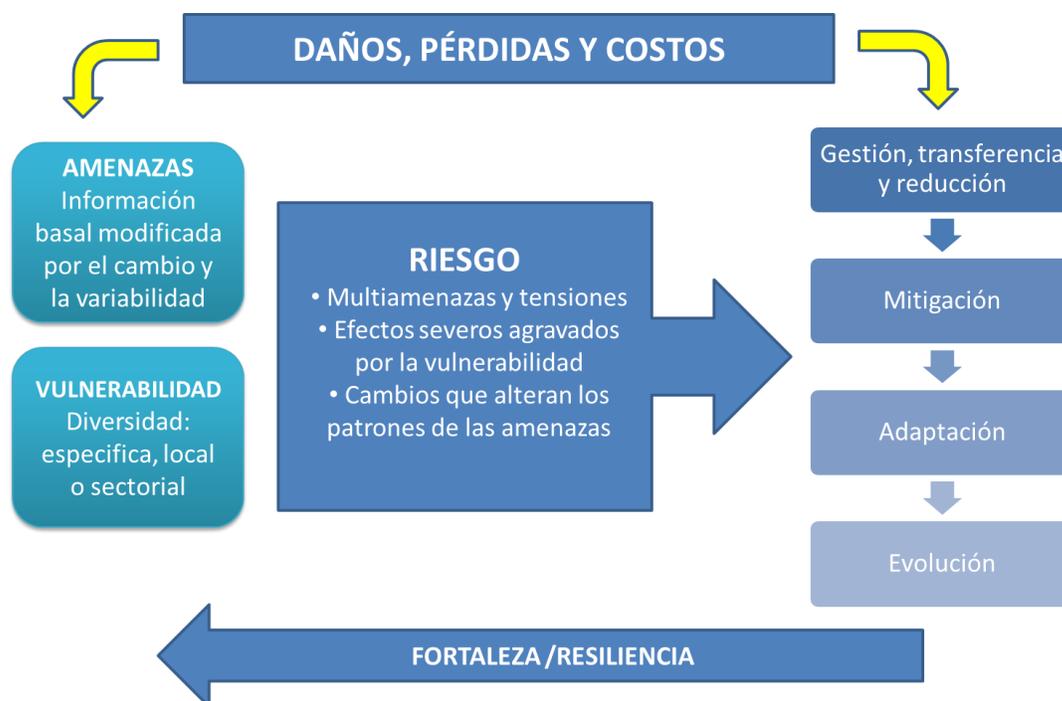
En un Taller desarrollado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) en 2009, donde se presentó el Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los desastres, se sugirió el siguiente esquema para la gestión del riesgo y la adaptación, el cual se ilustra en la figura 1.

El riesgo se puede valorar a través de dos enfoques:

- Ex post a partir de los daños y pérdidas ocasionados en el pasado.
- Ex ante a partir de:
  - Consideración de escenarios extremos posibles (eventos diseño).
  - Medición de los daños no ocasionados por la adecuada prevención, mitigación e inversión (análisis costo-beneficio).

Los criterios para valoración de los riesgos puede ser mediante el valor contable, el valor de reposición, el valor de reconstrucción, etc.

La figura 1 muestra el esquema desarrollado por la CEPAL para vincular el riesgo y la adaptación al cambio climático.



**Figura 1. Gestión del riesgo y adaptación**

Fuente: Elaboración propia, basados Zapata/CEPAL, 2003 y 2009.

Existen otras metodologías para la gestión de riesgos y que profundizan cómo los impactos del cambio climático son tratados como riesgos para que, a través de estas metodologías, puedan llevarse a cabo acciones de adaptación. Este tipo de herramientas se detallarán más adelante en la presente investigación.

Un riesgo es una vulnerabilidad identificada, por lo que a continuación se verá qué es la vulnerabilidad en el contexto del cambio climático.

## **1.4 La vulnerabilidad**

Adger *et al* (2004), definen que la vulnerabilidad de un sistema, población o individuo a una amenaza se refiere a la capacidad de hacer frente a esa amenaza. El nivel de preparación que cada sistema tenga definirá el grado de vulnerabilidad que tendría ante una amenaza climática. El término amenaza se refiere, en el cambio climático exclusivamente, a cualquier manifestación física, tal como: sequías, tormentas, inundaciones, lluvias intensas, etc.

La vulnerabilidad representa el grado en que un sistema natural o social es susceptible y no puede hacer frente a los efectos adversos del cambio climático.

Las evaluaciones de vulnerabilidad permiten identificar la naturaleza y el grado en el que el cambio climático puede afectar a un sector, tal como el transporte. Para ello se requiere definir el objetivo y propósito de la evaluación.

- El objetivo de la vulnerabilidad es saber cuántas personas o sistemas están expuestos a las amenazas climáticas.
- El propósito de evaluar los factores subyacentes a la vulnerabilidad es identificar medidas y políticas que la reduzcan.

La evaluación de la vulnerabilidad es un componente central dentro del proceso de adaptación, pues la información que proporciona esta evaluación permite diseñar medidas que minimicen o eviten el daño.

Las evaluaciones de la vulnerabilidad no requieren información compleja de modelos climáticos (que normalmente no se encuentran disponibles en muchos países), sino que a través de diversos factores y escenarios hipotéticos se puede determinar las afectaciones y la probabilidad de que éstos ocurran.

La evaluación de vulnerabilidad puede enfocarse en:

- Unidades de exposición socioeconómica (por ejemplo, grupo de personas, salud humana, medios de subsistencia).
- Biofísicas (por ejemplo, ecosistemas, especies, hábitats, agua).
- Combinaciones de ambas (por ejemplo, localidades, sectores).
- Escala (global, regional, nacional, distrital, estatal, comunitario, familiar o individual).

La evaluación puede darse bajo dos perspectivas: *top-down* y *bottom-up* (GIZ, 2013). El análisis *top-down* se refiere a evaluaciones basadas en escenarios que aplican proyecciones climáticas globales o regionales para evaluar impactos potenciales en unidades de exposición física o natural, tales como cuencas hidrográficas, infraestructura o sistemas de producción agrícola. En el análisis *bottom-up* la unidad de análisis suele ser más pequeña y localizada, como los hogares o las comunidades, se pueden utilizar escenarios en el corto plazo y se puede utilizar la variabilidad climática actual para su análisis.

En los enfoques integrados, los elementos tanto de arriba hacia abajo como de abajo hacia arriba se combinan para complementarse entre sí.

Una clasificación adicional consiste en distinguir entre enfoques basados en indicadores y basados en modelos. Estos últimos requieren más datos y análisis, mientras que el primero se basa en *proxies* disponibles.

Entre los enfoques basados en indicadores y basados en modelos se puede hacer uso de las cadenas de impacto, donde se representan las relaciones de causa-efecto entre los diferentes componentes de un sistema. Se basa en modelos muy simples que indican las relaciones entre los componentes.

En el Marco desarrollado por la PIARC (2015), la vulnerabilidad está en función del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático, así como la variación a la que un sistema está expuesto (exposición); y el grado en que se ve afectado algo, ya sea adversa o benéficamente, por estímulos relacionados con el clima (sensibilidad).

La vulnerabilidad puede ser evaluada a través de diferentes enfoques, por lo que cada organismo de carreteras debe considerar los datos que tenga disponibles, antes de realizar la evaluación y la selección de la metodología. Las evaluaciones de vulnerabilidad en ocasiones es probable que cuenten con un alto grado de especificidad para cada sitio, por lo que deben ser valoradas adecuadamente según lo determine la autoridad.

Los niveles de exposición en un sitio y que lo convierte en vulnerable puede estar dado por datos históricos y recientes, que se han registrado para generar conocimiento, o también basarse en proyecciones climáticas y la sensibilidad es el grado en que un sistema se ve afectado, ya sea adversa o benéficamente, por estímulos relacionados con el clima.

La vulnerabilidad de la infraestructura de transporte al cambio climático es, en parte, una función de su robustez y grado de protección frente a la exposición a los efectos del cambio climático.

Siguiendo a la evaluación de la vulnerabilidad viene la adaptación.

## **1.5 La adaptación**

Adaptación es un concepto que se entiende como la acción y el efecto de adaptar o adaptarse, un verbo que hace referencia a la acomodación o ajuste de algo respecto a otra situación.

Los sistemas naturales y humanos tienen la capacidad de hacer frente a diversos factores que los impacten, pero no siempre se pueden ajustar y revertir los efectos negativos, por lo que requieren adaptarse para moderar el daño que el cambio climático actual y sus efectos les provocan y les continuarán afectando en el futuro.

En el caso de un organismo vivo, se refiere a que éste ha podido acomodarse a las nuevas condiciones de su entorno, en el caso de los seres humanos se produce cuando el individuo se habitúa a múltiples circunstancias y condiciones.

Las personas y sus sociedades, a lo largo de la historia, se han ajustado para hacer frente a las condiciones climáticas en mayor o menor grado, esta respuesta de adaptación permitió que los pequeños asentamientos se convirtieran en grandes ciudades. Sin embargo, el cambio climático plantea nuevos riesgos que frecuentemente están fuera del rango de la experiencia histórica, estos incluyen: aumentos en las temperaturas y niveles medios del mar; cambios en los patrones de precipitación; derretimiento de glaciares y el permafrost; cambios en la intensidad y/o frecuencia de condiciones climáticas extremas, tales como sequías, olas de calor, inundaciones y huracanes.

La adaptación consiste en acciones deliberadas emprendidas para reducir las consecuencias adversas, así como aprovechar cualquier oportunidad beneficiosa.

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, 2008 (OCDE, por sus siglas en inglés), el proceso de adaptación al clima y al cambio climático es complejo y multifacético. Como tal, es muy difícil hacer una adaptación analítica y justa. Una serie de tipologías se han desarrollado para clasificar las acciones de adaptación. Por ejemplo, las medidas de adaptación se han clasificado de acuerdo con: tiempo (anticipada vs. reactiva); alcance (local vs. regional; corto plazo vs. largo plazo); propósito (autónomo vs. planeado; adaptación activa o pasiva); y agente de adaptación (sistemas naturales vs. humanos; individuos vs. colectivos; privados vs. públicos).

Dentro de todos estos marcos, las medidas de adaptación deberán adoptar dos formas generales: acciones relacionadas con la planificación y construcción de nueva infraestructura y, en segundo lugar, la adaptación y la "protección climática" de los sistemas existentes (Cochran, 2009).

La mayoría de los trabajos de la adaptación se han restringido a la identificación de impactos, a evaluar la vulnerabilidad y a la planificación de la adaptación, pero muy pocos se han realizado para evaluar los procesos de aplicación o los efectos de las medidas de adaptación.

Puede haber varios tipos de adaptación:

**Adaptación anticipada.** Adaptación que se produce antes de que se observen los impactos del cambio climático. También es referida como adaptación proactiva.

**Adaptación autónoma.** Adaptación que no constituye una respuesta consciente a los estímulos climáticos, sino que es provocada por cambios ecológicos en los sistemas naturales y por cambios en el mercado o bienestar de los sistemas humanos.

**Adaptación prevista.** Adaptación que es el resultado de una decisión política deliberada, basada en la conciencia de que las condiciones han cambiado o están a punto de cambiar y que la acción es necesaria para regresar, mantener o alcanzar un estado deseado.

En la actualidad se han implementado acciones de ingeniería o tecnológicas como respuestas de adaptación y, en ocasiones, están integradas a la gestión de desastres y gestión del agua.

Por otra parte, las acciones de adaptación adoptadas hacen hincapié en los beneficios incrementales, particularmente encaminados a aumentar la resiliencia de la infraestructura.

## 1.6 Resiliencia

La resiliencia es la capacidad de un sistema o de una comunidad para sobrevivir ante la interrupción y anticiparse, adaptarse y prosperar frente al cambio climático.

La resiliencia permite, en el corto o largo plazo, anticipar los riesgos y oportunidades que se pueden presentar en los sistemas de transporte, para asegurar la continuidad del servicio a pesar de la presencia de fenómenos climáticos, antes, durante o después de que éstos se presenten.

El concepto clave de la resiliencia es desarrollar una capacidad adaptativa continua.

Es común utilizar la resiliencia y la adaptación de forma intercambiable; sin embargo, la resiliencia es un concepto mucho más amplio, mientras que la adaptación son respuestas específicas a una amenaza del tipo climático para que la infraestructura trabaje de forma aceptable.

La resiliencia dobla el alcance de la adaptación, considera a ésta como primera fase y continua con un aumento de la capacidad del sistema adaptado. La resiliencia ofrece un enfoque más amplio y a largo plazo en el fortalecimiento de la capacidad al mismo tiempo que se reducen los impactos específicos.

La resiliencia sería un marco de planificación útil, pero resulta especialmente útil cuando puede incorporar actividades específicas de adaptación al clima en las metas a largo plazo a medida que se reconocen las amenazas.

Un proceso integrado de la adaptación involucra tres aspectos: la evaluación del riesgo, las respuesta de adaptación y un enfoque resiliente. La interacción de estos componentes conforman la gestión adaptativa como se ilustra en la figura 2.



**Figura 2. Enfoque de la gestión adaptativa**

Fuente: Elaboración propia.

La capacidad de resiliencia es aquella capaz de operar en el contexto del cambio y la disrupción, la superación de los problemas a corto plazo y la preparación para un futuro diferente y continuamente cambiante.

La falta de información para desarrollar escenarios climáticos impide que las poblaciones en general puedan incrementar sus niveles de resiliencia ante los diferentes tipos de amenazas climáticas.

## 1.7 Evaluación de la criticidad

El Marco desarrollado por la Administración Federal de Carreteras, 2012 (FHWA, por sus siglas en inglés), incluye dentro de la evaluación de la vulnerabilidad, una evaluación de la criticidad mediante la cual se restringen los activos carreteros. Esta evaluación permite identificar los activos carreteros más importantes de una red de una forma estructurada, para que estos sean examinados para determinar su vulnerabilidad al cambio climático.

Hay varios enfoques disponibles para la priorización de activos, que se dividen en dos categorías generales (estos enfoques generales también pueden utilizarse para priorizar los activos por razones distintas de la criticidad):

**Revisión de gabinete.** Este enfoque se basa en la formulación de criterios de criticidad con base en datos, donde los activos se clasifican en función de datos como el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), la clasificación funcional (geometría, jerarquía o jurisdicción), el tránsito en el movimiento de mercancías, la gestión de emergencias y el juicio de expertos. La falta de información complica este enfoque y no se recomienda valoraciones cualitativas. La ponderación de los criterios resulta complicado de asignar, ya que los actores involucrados podrían tener juicios diferentes.

**Participación de las partes interesadas.** La determinación de la criticidad de los activos basándose en el aporte de partes interesadas y expertos locales es un segundo enfoque para evaluar la criticidad. Los líderes del proyecto identificarán a un grupo de partes interesadas en la región con conocimientos especializados o intereses específicos (por ejemplo, actividad comercial, seguridad pública o mantenimiento de carreteras). Los líderes del proyecto entonces obtendrán la retroalimentación de estas partes interesadas en las cuales los activos puedan ser considerados críticos. La participación de estas partes ayuda a la obtención de información que no fácilmente se encuentre disponible; sin embargo, los resultados del proceso impulsado por las partes interesadas son altamente subjetivos y los resultados dependen de la calidad de la participación de las partes interesadas.

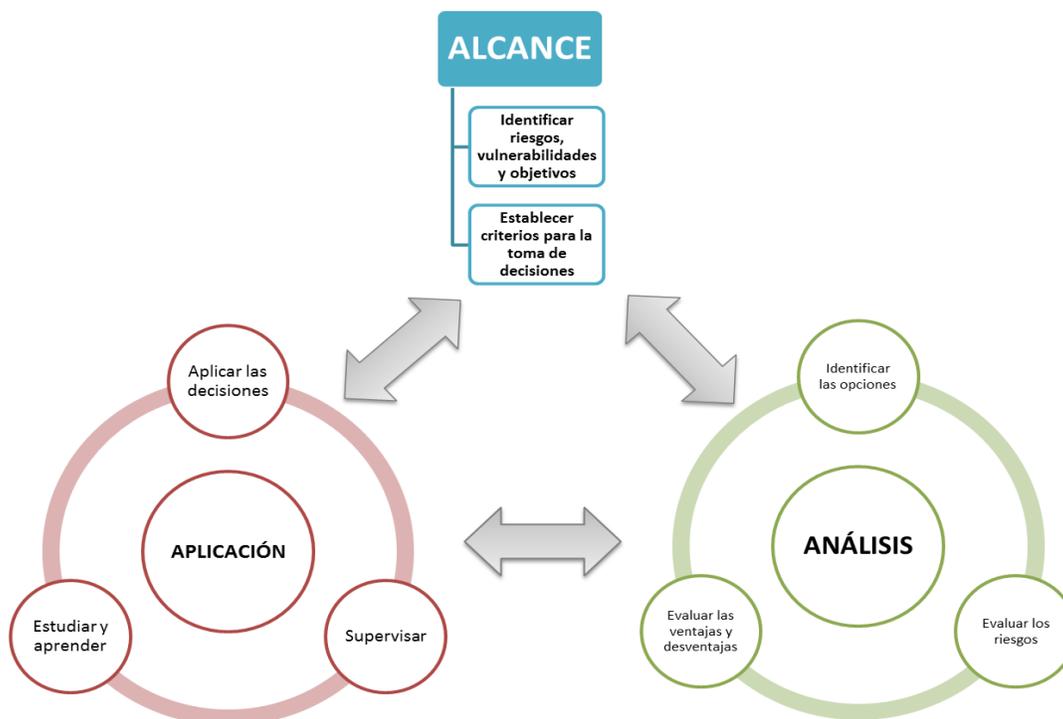
A menudo, los dos enfoques se combinan. Normalmente, una revisión documental identificará una lista inicial de activos críticos basados en datos comúnmente disponibles, como el TDPA o información económica para la región. El equipo del proyecto utilizará luego los resultados de la revisión documental para informar y estructurar la retroalimentación de las partes interesadas y de los expertos locales.



## 2 Adaptación al cambio climático

En algunos países, la adaptación se ha incorporado en algunos procesos de planificación, aunque la respuesta es limitada, ya que normalmente se integran a los programas del manejo de desastres o riesgos, la gestión de los recursos hídricos y los sistemas de alerta temprana; sin embargo, se requiere un mayor trabajo en diseminar el conocimiento, capacitar a la sociedad y a los profesionales, realizar ajustes e implementar más acciones de adaptación, asegurando incrementar los co-beneficios de adaptarse.

El proceso de adaptación no puede ser estático, sino un proceso iterativo que permita evaluar las incertidumbres actuales del clima y que, a medida que se adquiera más conocimiento, se podrá ser más asertivo en el diseño de las medidas de adaptación. El IPCC (2014), diseñó un proceso de adaptación iterativa, con múltiples retroalimentaciones, para que se puedan evaluar los resultados, acumular conocimientos y apoyen a la toma de decisiones (ver Figura 3).



**Figura 3. Adaptación al cambio climático como un proceso de gestión integral iterativa**

Fuente: Elaboración propia, basados en: IPCC, 2014

Este proceso ilustra claramente la adaptación en tres etapas que se interrelacionan de manera interna, aunque este proceso está regido por el contexto externo, estos factores externos influyen en la adaptación a través de múltiples maneras, tales como políticas nacionales para la adaptación, conocimiento generado (bases de datos, mapas climáticos, red de carreteras, etc.), involucramiento de los tomadores de decisiones, etc.

La bibliografía existente, relacionada con la adaptación al cambio climático para el sector de infraestructura, es principalmente de naturaleza cualitativa, con énfasis en recomendaciones, advertencias y buenas prácticas.

Scherag y Grambsch (1998) sugieren 9 principios que deben considerarse para diseñar políticas para la adaptación:

- Los efectos del cambio climático varían según la región.
- Los efectos del cambio climático varían según el grupo demográfico.
- El cambio climático plantea riesgos y oportunidades.
- Los efectos del cambio climático deben considerar un contexto con múltiples factores de estrés, que pueden ser tan importantes para el diseño de respuestas adaptativas como la sensibilidad al cambio.
- La adaptación tiene un costo.
- Las respuestas adaptativas varían en eficacia, como lo demuestran los esfuerzos actuales para hacer frente a la variabilidad climática.
- La naturaleza sistémica del impacto climático complica el desarrollo de la política de adaptación.
- La mala adaptación puede dar lugar a efectos negativos tan graves como los efectos inducidos por el clima que se evitan.
- Muchas oportunidades de adaptación tienen sentido si se realizan o no los efectos del cambio climático.

El concepto de "ventaja adaptativa", según Chinowsky *et al.* (2011), permite identificar los beneficios de la adaptación de cada país para los cambios climáticos proyectados, el cual proveerá para los tomadores de decisiones un contexto amplio para entender los impactos futuros del clima.

La adaptación al cambio climático, que significa tomar medidas para aumentar la resiliencia y minimizar los costos, es esencial. Ya no es posible evitar el cambio climático que se producirá en los próximos dos o tres decenios, pero todavía es posible proteger a las sociedades y economías de sus impactos en cierta medida, por ejemplo, contar con infraestructura resiliente al clima (Stern, 2006).

Las estrategias de adaptación en el sector de transporte pueden clasificarse de acuerdo al Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2014) en tres categorías principales:

- i) las que se dirigen a identificar los riesgos y vulnerabilidades.
- ii) las que procuran proteger y fortalecer la infraestructura vulnerable, y

- iii) las que tienen por objetivo crear otras vías para mejorar la resiliencia del sistema de transporte.

Las opciones de adaptación en el sector en general, de acuerdo al Banco Asiático de Desarrollo (2011), pueden dividirse en opciones de ingeniería (estructurales) tales como: las condiciones del subsuelo, especificaciones de materiales, proyecto geométrico, drenaje y erosión, y estructuras de ingeniería para la protección; las opciones que no son de ingeniería: planificación del mantenimiento y los sistemas de alerta temprana, planificación del uso de la tierra y la gestión ambiental.

## 2.1 Principios para una adaptación efectiva

De acuerdo al último reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (2014), para obtener una adaptación efectiva recomiendan una serie de principios que a continuación se enuncian.

- La adaptación es específica para un sitio y su contexto, y no existe un método único para reducir los riesgos que resulten adecuados para todas las situaciones.
- La planificación y ejecución de la adaptación puede ser mejorada a través de acciones complementarias en todos los niveles, desde un ámbito personal hasta el gubernamental.
- El primer paso hacia la adaptación para encarar el cambio climático es reducir la vulnerabilidad y la exposición a la variabilidad climática actual. Las estrategias pueden incluir acciones con co-beneficios para otros objetivos.
- La planificación e implementación de la adaptación, en todos los niveles de gobierno, están supeditados a los valores de la sociedad, los objetivos y la percepción del riesgo. El reconocimiento de los diversos intereses, circunstancias, contexto socio-cultural y las expectativas pueden beneficiar en el proceso de toma de decisiones.
- El conocimiento de los sistemas y prácticas indígenas, locales y sus tradiciones, incluyendo la visión integral de las poblaciones y comunidades indígenas y el medio ambiente, son un recurso importante para la adaptación al cambio climático.
- El apoyo a las decisiones es más efectivo cuando es sensible al contexto y a la diversidad de los diferentes tipos de decisiones, los procesos de decisión y sus actores (instituciones que vinculan la ciencia con la toma de decisiones).
- La integración de la adaptación en la planificación y la toma de decisiones puede promover sinergias con el desarrollo y la reducción del riesgo de desastres.
- Los instrumentos económicos existentes y emergentes puedan fomentar la adaptación al ofrecer incentivos para anticipar y reducir el impacto.

- Los mecanismos de financiación del riesgo en los sectores público y privado, como los consorcios de seguros y riesgos, pueden contribuir a que aumente la resiliencia.
- Las barreras existentes pueden interactuar para impedir la planificación e implementación de la adaptación (escasos recursos económicos y financieros, incertidumbre de las proyecciones climáticas, herramientas limitadas, etc.).
- Una mala planificación pone especial énfasis en los resultados a corto plazo; también una consecuencia demasiado anticipada puede resultar en una mala adaptación.
- Existe poca evidencia que indique un desfase entre las necesidades mundiales de adaptación y los fondos disponibles para ello.

## **2.2 Gestión de riesgos del cambio climático**

La atención de los riesgos del cambio climático es esencial dentro del proceso de adaptación al cambio climático, donde existen tres enfoques para abordarlos y se muestran en la tabla 2.1, en la cual se exponen únicamente aquellos que puedan tener un impacto para el sector transporte.

Existen diversas metodologías para la gestión de riesgo, las cuales se detallan en el capítulo 4 del presente documento.

La adaptación puede ampliar la capacidad de los sistemas naturales y humanos para hacer frente a un clima cambiante.

La toma de decisiones basada en el riesgo puede utilizarse para evaluar los límites potenciales de la adaptación.

Algunas limitaciones para la adaptación se presentan cuando las acciones de adaptación, para resolver una problemática de un sistema, no están disponibles actualmente. Los valores subjetivos de los actores políticos y sociales influyen la percepción y atención de la adaptación al cambio climático.

Puede haber una necesidad de adaptación transformacional para cambiar los atributos fundamentales de un sistema en respuesta a los impactos reales o esperados del cambio climático.

La existencia de límites para la adaptación sugiere que el cambio transformacional pudiera ser un requisito para un desarrollo sustentable dentro de un clima cambiante, no sólo para adaptarse a los impactos del cambio climático, sino para modificar los sistemas y estructuras, las relaciones económicas y sociales, y las creencias y comportamientos que contribuyen al cambio climático.

Tabla 2.1 Enfoques para la gestión de riesgos del cambio climático

Enfoque	Categoría	Ejemplos
Reducción de la vulnerabilidad y la exposición	Gestión de riesgos de desastres	Sistemas de alerta temprana; cartografía de peligros y vulnerabilidades; drenaje mejorado; refugios contra inundaciones y ciclones; códigos y prácticas de edificación; gestión de tormentas y aguas residuales; mejoras del transporte y la infraestructura vial.
	Planificación espacial o de uso del suelo	Infraestructuras y servicios adecuados; gestión del desarrollo en las zonas inundables y otras zonas de alto riesgo; planificación urbanística y programas de mejoras; legislación sobre división territorial.
Adaptación	Estructura física	<u>Opciones de ingeniería</u> : malecones y estructuras de protección costera; diques para el control de crecidas; drenaje mejorado; refugios contra inundaciones y ciclones; elaboración de códigos y prácticas; gestión de tormentas y aguas residuales; mejoras del transporte y la infraestructura vial. <u>Opciones tecnológicas</u> : elaboración de esquemas y vigilancia de los peligros y vulnerabilidades; sistemas de alerta temprana; aislamiento de edificios; desarrollo, transferencia y difusión de tecnología. <u>Opciones ecosistémicas</u> : restauración ecológica; conservación del suelo; forestación y reforestación.
	Institucional	<u>Opciones económicas</u> : incentivos financieros; seguros; bonos de catástrofe; fondos para imprevistos en casos de desastre; asociaciones público-privadas. <u>Leyes y reglamentos</u> : normas y prácticas de edificación; legislación en apoyo de la reducción de riesgos de desastre; legislación en favor de la contratación de seguros. <u>Políticas y programas nacionales y gubernamentales</u> : planes de adaptación nacionales y regionales e incorporación general de la adaptación; planes de adaptación subnacionales y locales; planificación y preparación para casos de desastre; ordenación integrada de los recursos hídricos; ordenación integrada de las zonas costeras; adaptación de la comunidad.
Transformación	Social	<u>Opciones educativas</u> : sensibilización e integración en la educación; intercambio de conocimientos; investigación; plataformas de intercambio de conocimientos y aprendizaje. <u>Opciones de información</u> : elaboración de esquemas de peligros y vulnerabilidades; sistemas de alerta temprana y respuesta; vigilancia y teledetección sistemáticas; servicios climáticos. <u>Opciones de comportamiento</u> : preparación de viviendas y planificación de la evaluación; conservación del suelo y el agua; desatasco de drenajes pluviales.
	Cambios	<u>Práctica</u> : innovaciones sociales y técnicas, cambios de comportamiento o cambios institucionales y de gestión que produzcan modificaciones sustanciales en los resultados. <u>Política</u> : decisiones y medidas de carácter político, social, cultural y ecológico en sintonía con la disminución de la vulnerabilidad y el riesgo y el apoyo de la adaptación, la mitigación y el desarrollo sustentable. <u>Personal</u> : presunciones, creencias, valores y visiones del mundo individuales y colectivos que influyan en las respuestas al cambio climático.

Fuente: Elaboración propia, basado en: IPCC, 2014

A nivel nacional, la transformación es más eficaz cuando refleja las propias visiones y enfoques de un país para lograr un desarrollo sustentable.

## **2.3 Integración de la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático**

El riesgo ante desastres naturales se podría presentar cuando una infraestructura carretera tiene deficiencias o podría responder inadecuadamente ante la presencia de fenómenos climáticos, es por eso que se debe realizar un análisis del riesgo dentro de su proceso de gestión y, con los resultados, poder implementar acciones para la adaptación al cambio climático.

La integración de la gestión del riesgo y la adaptación es de gran importancia para los programas de inversión pública, para que los proyectos de infraestructura carretera a financiar incorporen en su diseño y ejecución una clara orientación para asegurar la resiliencia de la infraestructura.

Para lograr una aplicación conjunta se requiere de la existencia previa de legislación, tales como normas o reglamentos, auxiliados de procedimientos y marcos metodológicos para la complementariedad de ambas herramientas.

## **2.4 Desarrollo resiliente al clima**

La mayoría de los países en desarrollo presenta un gran número de retos a encarar, por lo que resulta complicado prestar atención al cambio climático. Sin embargo, debido a que las amenazas del cambio climático ponen en riesgo las metas de desarrollo, es necesario asociar la adaptación en el proceso de desarrollo para construir un desarrollo resiliente al clima (USAID, 2014).

Un desarrollo resiliente al clima asegura que las personas, la infraestructura, la economía y las organizaciones preserven su desarrollo ante las amenazas actuales del clima y su variabilidad climática, al adaptarse a los cambios futuros y poder minimizar los daños.

En general, los cambios comparados con un desarrollo tradicional van asociados a:

- Planear hacia el futuro debe incluir las amenazas del cambio climático por más de un siglo. Los profesionales del desarrollo deben identificar los desafíos climáticos futuros y relacionarlos con los desafíos actuales.
- Identificar los estresores climáticos y utilizar información apropiada del clima para cada actividad relevante, como el transporte, que van desde las tendencias observadas hasta las proyecciones modeladas.
- Reducir la vulnerabilidad asociada a los estresores climáticos. El desarrollo resistente al clima debe reducir eficazmente los daños causados por el cambio climático.
- Incorporar flexibilidad o robustez en las actividades de desarrollo para emplear múltiples enfoques en la gestión del riesgo, favorece alternativas

que conserven beneficios aún si el clima cambia en mayor o menor medida, y la gestión del riesgo de una manera adaptativa.

- La adaptación es necesariamente un proceso continuo en lugar de una acción única, porque el clima continuará cambiando, con el tiempo surgirán nuevas opciones de respuesta y disponibilidad de buenas prácticas.

## 2.5 Las implicaciones económicas en el proceso de adaptación

La toma de decisiones para la adaptación tienen su base en los gobiernos locales o regionales, quienes para justificar la inversión para la adaptación se basa en los beneficios que esta acción tendrá en los sistemas.

De esta manera, las decisiones de adaptación tendrán un carácter corporativo y planificado del gobierno local. Al tomar estas decisiones de adaptación, las autoridades aplicarán las herramientas tradicionales de apoyo a la toma de decisiones, tales como análisis de costo-beneficio, análisis de costo-efectividad y análisis multicriterio (OCDE, 2008).

Los tomadores de decisiones más expertos basarán su decisión en técnicas de evaluación de inversiones de las finanzas corporativas. Pueden, por ejemplo, calcular el valor actual neto de una inversión de adaptación, analizar sus riesgos y retornos o determinar la rentabilidad del capital empleado. Lo que estas decisiones tienen en común es que se basan en una comparación de las ventajas y desventajas de los costos y beneficios de un cierto curso de acción (Mendelsohn, 2000).

Utilizando los resultados de los modelos económicos formales, Stern (2006) estima que si se actúa, los costos y riesgos globales del cambio climático equivaldrán a perder al menos el 5% del PIB mundial cada año, actualmente y en el futuro. Si se tiene en cuenta una gama más amplia de riesgos e impactos, las estimaciones de daño podrían elevarse hasta un 20% del PIB o más.

La adaptación costará decenas de miles de millones de dólares al año sólo en los países en desarrollo y aumentará aún más presión sobre los recursos limitados en esas regiones; por lo tanto, los esfuerzos de adaptación deberían acelerarse, especialmente en los países en desarrollo.

Los costos de adaptación podrían aumentar varias veces si, además de las medidas que reducen directamente los daños climáticos, se implementan acciones para aumentar la capacidad adaptativa, como por ejemplo, las inversiones en educación y generación de conocimiento.

De esta manera los elementos más importantes a considerar en una evaluación económica de la adaptación al cambio climático es:

- Los costos y beneficios de la adaptación.
- Los plazos de la adaptación.
- Manejar la incertidumbre del clima futuro.
- Asignar recursos para incentivar la adaptación

## **2.6 Barreras para la adaptación al cambio climático**

Existen muchas barreras para la adopción de medidas para comprender y adaptarse al cambio climático, las cuales deben eliminarse de inmediato para empezar a tomar medidas eficaces para aumentar la capacidad de resiliencia de las carreteras ante el cambio climático.

Derivado de un cuestionario aplicado por la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC) en 2014-2015, se obtuvieron una serie de comentarios sobre las barreras que los diversos países han experimentado en el proceso de adaptación para hacer frente a los impactos del cambio climático. A continuación se describen alguna de ellas obtenidas de PIARC (2015) y las sugeridas por los autores.

- Falta de conocimiento, comprensión, orientación y asesoramiento en materia de adaptación al cambio climático (incluyendo aspectos relacionados con los efectos e impactos del cambio, y el modelado climático).
- Falta de coordinación técnica y política con el fin de garantizar la capacidad de resiliencia a largo plazo, así como una clara falta de voluntad política de los tomadores de decisiones.
- Dificultades en la identificación de prioridades de acción (especialmente cuando otras demandas del sector pueden parecer que tienen prioridad).
- Recursos limitados (materiales, tecnologías, humanos y financieros).
- Falta de integración de la adaptación al cambio climático en otros sectores, planes, programas, estrategias etc.
- Incertidumbre sobre los pronósticos futuros del clima.
- Falta de funciones y responsabilidades definidas en el sector transporte, así como de colaboración con otros actores.
- Enfoques en la construcción de la infraestructura en el corto plazo, sin crear capacidades en el largo plazo.
- Falta de voluntad para cambiar el comportamiento de la operación de los organismos de carreteras (Business as usual).
- Poca o nula información climática en bases de datos para generar conocimiento y realizar pronósticos.

- Guías/metodologías/herramientas para la comprensión y la priorización de riesgos.
- Falta de un modelo de desarrollo de negocio de los tomadores de decisiones.
- El hecho de que la mitigación todavía es vista como más importante que la adaptación.
- Las preocupaciones sobre los riesgos del cambio climático y la adaptación pueden ser menos con respecto a otras amenazas.

## 2.7 Actores involucrados en la adaptación al cambio climático

La adaptación al cambio climático pareciera no tener un liderazgo adecuado en los diferentes sectores, a pesar de que para el caso del sector transporte, la responsabilidad es inherente a los gobiernos, ya sean de nivel nacional, regional o local. En el Marco descrito por Mehrotra *et al.* (2009) para la comprensión del riesgo climático, un componente importante es evaluar la capacidad y la voluntad de las instituciones y los actores involucrados en un sector, en el proceso de adaptación de un sistema.

En años recientes algunos actores han tomado interés en las acciones inherentes al cambio climático, tales como las organizaciones no gubernamentales, los medios de comunicación y grupos ciudadanos.

Algunos otros casos han comenzado a realizar esfuerzos en los organismos gubernamentales y se han ido expandiendo hacia otros actores, tales como las universidades, residentes implicados, empresas, grupos ciudadanos, hasta generar asociaciones pública privadas. Este involucramiento ayuda a aumentar el nivel de participación, pero también para aumentar el nivel de consciencia de los actores para responder ante el cambio climático, incrementado la denominada capacidad adaptativa.

Las asociaciones de profesionales y la academia parecen ser actores de gran apoyo para comunicar de manera directa a los tomadores de decisiones sobre los beneficios de la adaptación al cambio climático y de las consecuencias de no hacerlo.

Cada proyecto de adaptación o sector en particular puede tener múltiples actores involucrados que, de acuerdo a su alcance, pueden ser varios gobiernos locales, estatales, departamentos públicos, empresas, etc. Otros aspectos a considerar de los actores involucrados son qué nivel de participación deben tener y qué nivel de combinación tendrán entre ellos, así como la colaboración entre ellos y cómo sería el nivel de cooperación (¿horizontal?). El proceso debe involucrar a los expertos

locales y sus actores de interés con el objeto de desarrollar capacidades adaptativas locales.

La tabla 2.2 presenta un panorama base de actores involucrados en el desarrollo y operaciones de la infraestructura de transporte, aunque no es una lista exhaustiva, sino enunciativa. La distribución específica de los actores puede cambiar significativamente de un país/región a otro dependiendo particularmente de la proporción entre actores públicos y privados involucrados.

**Tabla 2.2. Actores involucrados en la construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura para el transporte**

<b>Función</b>	<b>Actores</b>
Financiamiento	Instituciones de financiamiento, Organismos gubernamentales, Fondos de financiamiento
Construcción	Autoridades públicas, Empresas de construcción, Empresas de consultoría, Empresas de planeación, Agencias regulatorias
Mantenimiento	Operadores, Contratistas
Operación	Operadores del transporte, Empresas transportistas

Fuente: Elaboración propia basada en Cochran, 2009.

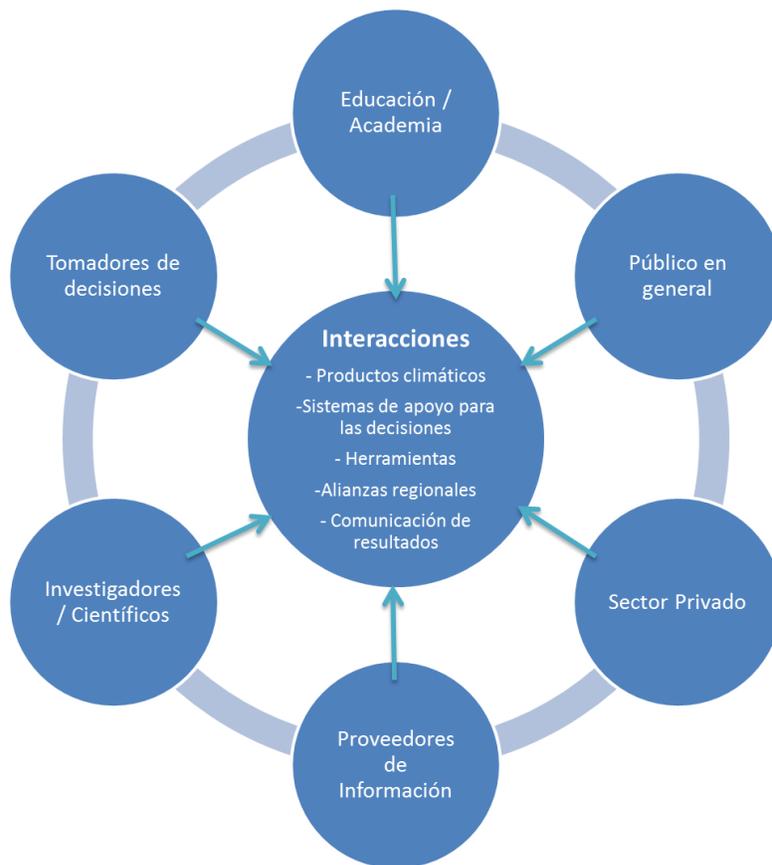
Sin embargo, es importante tener en cuenta (i) la variedad de actores, (ii) el acceso a recursos (técnicos y financieros), (iii) la distribución de impactos y los costos de adaptación, y (iv) la comunicación entre grupos de actores para comprender mejor el potencial y los incentivos para la adaptación (Cochran, 2009).

En México, el sector del transporte implica una amplia gama de actores no sólo en la construcción, financiamiento y operación de las infraestructuras, sino también en su uso diario.

Un grupo importante de actores son los usuarios de las diferentes infraestructuras de transporte, el cual es un grupo que atraviesa todas las divisiones económicas y sociales dentro de un país dado. En este grupo es importante considerar su bienestar, por lo que una infraestructura afectada por el cambio climático impacta en costos económicos y sociales, directa o indirectamente, a la sociedad afectada por la interrupción del transporte. Esto sugiere un papel crucial del gobierno para asegurar la capacidad de las infraestructuras de transporte para satisfacer las necesidades de accesibilidad, conectividad, etc., bajo el cambio climático.

La necesidad de una acción concertada entre una amplia gama de actores para adaptarse proactivamente al cambio climático plantea una serie de dificultades, ya que en muchos casos los costos y beneficios no se distribuyen de manera uniforme.

El Banco Interamericano de Desarrollo (IDB, 2014), desarrolló una herramienta para la adaptación al cambio climático para los países de Latinoamérica y el Caribe, donde derivado de los diálogos regionales identificaron los actores involucrados en el proceso de adaptación y su interacción. Las comunicaciones entre los científicos del clima y los responsables de la toma de decisiones, a través de las regiones, sectores, gobiernos, instituciones y grupos de partes interesadas, han sido identificadas como un factor limitante importante para el uso eficaz de la información climática, por lo que se requieren esfuerzos adicionales para vincular a los actores involucrados y mejorar la comunicación. La figura 4 muestra el resultado del análisis de las interacciones de los actores para facilitar la comunicación en la región.



**Figura 4. Interacción entre actores involucrados en el cambio climático**

Fuente: Elaboración propia, basados en IDB, 2014.

Para que este enfoque sea exitoso, tiene que ocurrir en la intersección que los múltiples actores podrán usar los productos de comunicación climática adaptados a sus necesidades, al mismo tiempo estos deberán ser consistentes entre todos los actores.



### **3 Políticas nacionales para la adaptación**

---

Desde la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático en 1992 y su consolidación en 1994, México formó parte de este primer acuerdo el cual lo constituyeron 196 países, los cuales acordaron buscar resolver los problemas relacionados con el cambio climático a una escala mundial.

En 1997, las partes acordaron adoptar el Protocolo de Kioto, cuyo objetivo principal es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través de medidas más enérgicas para los países más contaminantes. Dicho Protocolo fue ratificado por México en el año 2000, sin embargo, no contemplaba acciones de adaptación, solo mecanismos de financiamiento para los países en desarrollo.

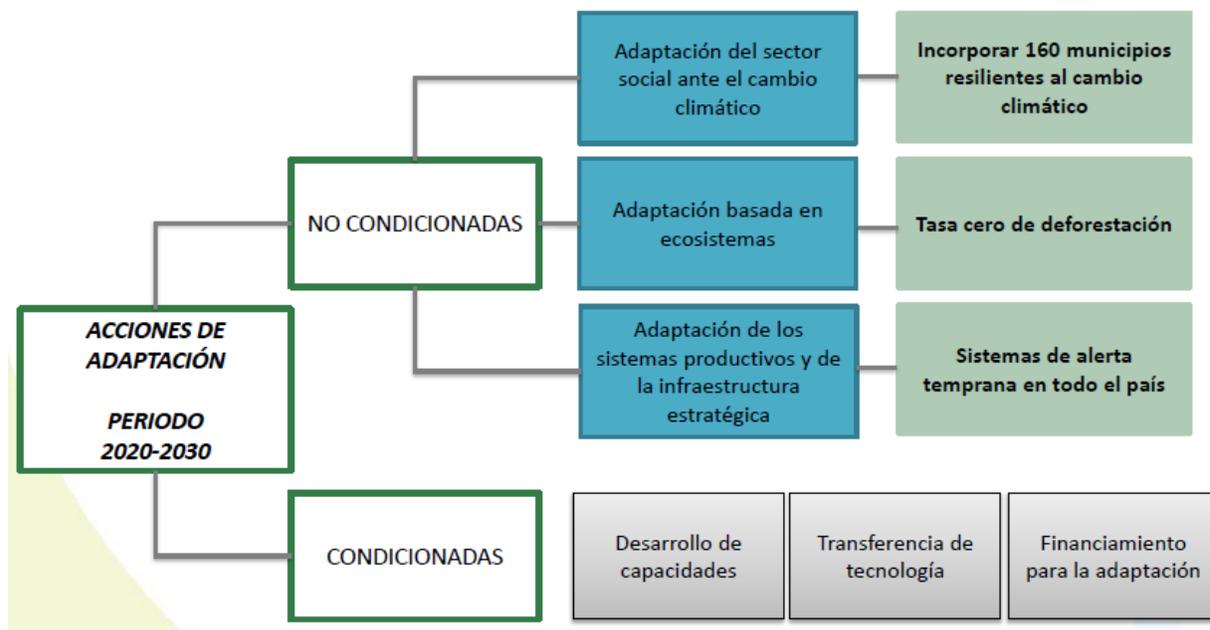
La cumbre del clima, celebrada en Doha, en Catar, pretendió sentar las bases para lograr un acuerdo para reducir las emisiones para asegurar que la temperatura global no supere los 2°C. El resultado no logró los acuerdos necesarios que desde la Conferencia de Copenhague en 2009 se había pretendido consolidar.

La COP 21, cuyos resultados se encuentran plasmados en el llamado “Acuerdo de París”, donde los países firmantes han establecido sus metas de reducción de GEI denominadas como “Contribuciones previstas determinadas a nivel nacional”, en el cual México comprometió una reducción del 22% de GEI que representan 762 M-ton de CO<sub>2</sub> equivalente. En el tema de adaptación, la propuesta de México se resume en la figura 5.

En el ámbito nacional, posterior a la ratificación del Protocolo de Kioto, se desarrolló la primera Estrategia Nacional de Cambio Climático para el periodo 2007-2012 y un primer Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012, cuyos resultados no fueron del todo satisfactorios por falta de una plataforma jurídica que diera una mayor obligatoriedad a las acciones comprometidas, de esta manera surgió la idea de generar una Ley en materia de Cambio Climático.

De esta manera la política nacional en México está regida principalmente por la Ley General de Cambio Climático (LGCC), promulgada en el 2012, la cual ha pretendido ser la base para formular acciones en nuestro país en materia de cambio.

La ley establece, entre otros aspectos, la creación de instituciones, marcos legales e instrumentos financieros que permitan apoyar al país a responder a los desafíos debidos al cambio climático, así como a la formulación de un modelo de desarrollo para el país bajo en carbono.



**Figura 5. Acciones de Adaptación para México sobre cambio climático**

Fuente: INECC, 2016.

Esta ley, en el artículo 7, define las atribuciones de la federación para:

VI. Establecer, regular e instrumentar las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático, de conformidad con esta Ley, los tratados internacionales aprobados y demás disposiciones jurídicas aplicables, en las materias siguientes: i. Transporte federal y comunicaciones.

De esta manera a través de la entidad correspondiente, tanto de la SEMARNAT como el INECC trabajaron las políticas nacionales vigentes que a continuación se describen brevemente.

En México en el año 2013 se publicó la segunda Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), Visión 10-20-40, el cual es un instrumento que guiará las acciones nacionales en los próximos 40 años en materia de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) y para construir una sociedad con mayor resiliencia ante los fenómenos del cambio climático.

La ENCC resulta entonces ser un instrumento que enmarca la política nacional sobre cambio climático para los tres órdenes de gobierno (ver figura 6).

La política nacional tiene como base seis pilares estratégicos que permitirán fortalecer y mantener una estrecha liga entre las acciones de mitigación y adaptación en el país.

NACIONAL		FEDERAL	ESTATAL	MUNICIPAL
<b>MARCO JURÍDICO</b>	Ley General de Cambio Climático		Leyes estatales en materia de cambio climático existentes <sup>1</sup>	
<b>PLANEACIÓN</b>	Estrategia Nacional de Cambio Climático	Programa Especial de Cambio Climático	Programas estatales de cambio climático <sup>2</sup>	Programas municipales en materia de cambio climático
<b>ARREGLOS INSTITUCIONALES</b>	Sistema Nacional de Cambio Climático Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	Comisión Intersecretarial de Cambio Climático Consejo de Cambio Climático	Comisiones estatales intersecretariales de cambio climático <sup>3</sup>	
<b>INSTRUMENTOS</b>	Registro Nacional de Emisiones Inventario Nacional de Emisiones Atlas Nacional de Riesgos Sistema de Información	Normas Oficiales Mexicanas	Inventarios Estatales de Emisiones Atlas estatales de riesgos	Atlas de riesgos de municipios vulnerables
<b>EVALUACIÓN</b>	Coordinación de Evaluación INECC	Coordinación de Evaluación INECC	Procedimientos de evaluación del programa estatal	Procedimientos de evaluación del programa municipal
<b>FINANCIAMIENTO</b>	Fondo de Cambio Climático	Fondo de Cambio Climático	Fondo de Cambio Climático y Fondos Estatales	Fondo de Cambio Climático y gestión de otros recursos

**Figura 6. Instrumentos de política en México sobre cambio climático**

Fuente: ENCC, 2013.

Dichos pilares buscan lo siguiente:

- Contar con políticas y acciones climáticas transversales, articuladas, coordinadas e incluyentes.
- Desarrollar políticas fiscales e instrumentos económicos y financieros con enfoque climático.
- Implementar una plataforma de investigación, innovación, desarrollo y adecuación de tecnologías climáticas y fortalecimiento de capacidades institucionales.

- Promover el desarrollo de una cultura climática.
- Instrumentar mecanismos de Medición, Reporte, Verificación y Monitoreo y Evaluación.
- Fortalecer la cooperación estratégica y el liderazgo internacional.

Bajo los principios de estos pilares, se plantearon para México 3 ejes estratégicos, que se enuncian a continuación:

- A.1 Reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia del sector social ante los efectos del cambio climático.
- A.2 Reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de la infraestructura estratégica y sistemas productivos ante los efectos del cambio climático.
- A.3 Conservar y usar de forma sustentable los ecosistemas y mantener los servicios ambientales que proveen.

De la estrategia de adaptación 2, se desprenden dos líneas acciones que incluyen al transporte y que dan pauta al presente trabajo, y son las siguientes:

- A.2.11 Fortalecer la infraestructura estratégica existente (comunicaciones, transportes, energía, entre otras) considerando escenarios climáticos.
- A.2.12 Incorporar criterios de cambio climático en la planeación y construcción de nueva infraestructura estratégica y productiva.

Por su parte, el Programa Especial de Cambio Climático 2013-2018 (PECC), publicado en abril de 2014, en materia de adaptación planteó el siguiente objetivo 1 “Reducir la vulnerabilidad de la población y sectores productivos e incrementar su resiliencia y la resistencia de la infraestructura estratégica”.

Derivado de este objetivo se desprende la Estrategia 1.3, que buscará “Fortalecer la infraestructura estratégica e incorporar criterios de cambio climático en su planeación y construcción”.

Las líneas de acción para la adaptación de la infraestructura de transporte, y son:

- 1.3.4 Mantener y aumentar los niveles de resiliencia en la infraestructura de comunicaciones.
- 1.3.5 Implementar programas a fin de contar con infraestructura nacional de mayor capacidad de resistencia ante fenómenos naturales.

De esta manera quedan enmarcadas las acciones de México en materia de políticas sobre cambio climático, que a través del tiempo han podido concretarse tanto el contexto internacional, como el nacional y que han dado rumbo a las acciones para mitigar y adaptar la infraestructura del transporte ante el cambio climático. La figura 3 muestra un esquema a través de una línea del tiempo sobre las acciones de México en materia de cambio climático.



**Figura 7. Acciones de México en materia de cambio climático**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1 Alineación de las políticas de adaptación al cambio climático

Para impulsar el impacto en los resultados del Programa Especial de Cambio Climático 2013-2018, se realizó en el mismo una alineación de las políticas del gobierno federal en materia de adaptación, la cual se puede analizar en la tabla 3.1.

La tabla 3.1 muestra el alineamiento de la política nacional para la adaptación al cambio climático, con base en el Plan Nacional de Desarrollo y los objetivos de los diversos Programa Sectoriales, que transversalmente han sido unidos al objetivo 1 del PECC.

**Tabla 3.1 Alineamiento de la política nacional para la adaptación al cambio climático**

Meta Nacional	Objetivo de la Meta Nacional	Estrategias del Objetivo de la Meta Nacional	Objetivos de los Programas Sectoriales(49) con los que se vincula el PECC	Objetivo del Programa Especial de Cambio Climático
México en Paz	<b>Objetivo 1.6.</b> Salvaguardar a la población, a sus bienes y a su entorno ante un desastre de origen natural o humano.	<b>Estrategia 1.6.1.</b> Política estratégica para la prevención de desastres.	<p><b>Objetivo 2, SEMARNAT:</b> "Incrementar la resiliencia a efectos del cambio climático y disminuir las emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero".</p> <p><b>Objetivo 5, SEGOB:</b> "Coordinar el Sistema Nacional de Protección Civil para salvaguardar a la población, sus bienes y entorno ante fenómenos perturbadores"</p> <p><b>Objetivo 2, SEMAR:</b> "Fortalecer las capacidades de respuesta operativa de la Institución contribuyendo a garantizar la Seguridad Nacional y la protección al medio ambiente marino".</p> <p><b>Objetivo 2, SEDESOL:</b> "Construir un entorno digno que propicie el desarrollo a través de la mejora en los servicios básicos, la calidad y espacios de la vivienda y la infraestructura social".</p> <p><b>Objetivo 2, SENER:</b> "Optimizar la operación y expansión de infraestructura eléctrica nacional y; Objetivo 5: Ampliar la utilización de fuentes de energía limpias y renovables, promoviendo la eficiencia energética y la responsabilidad social y ambiental".</p> <p><b>Objetivos 3, SAGARPA:</b> "Promover mayor certidumbre en la actividad agroalimentaria mediante mecanismos de administración de riesgos", y</p> <p><b>Objetivo 5:</b> "Contribuir a erradicar la carencia alimentaria en el medio rural".</p> <p><b>Objetivo 3, SCT:</b> "Generar condiciones para una movilidad de personas integral, ágil, segura, sustentable e incluyente, que incremente la calidad de vida".</p> <p><b>Objetivo 3, SALUD:</b> "Reducir los riesgos que afectan la salud de la población en cualquier actividad de su vida."</p>	<b>Objetivo 1.</b> Reducir la vulnerabilidad de la población y sectores productivos e incrementar su resiliencia y la resistencia de la infraestructura estratégica.

			<p><b>Objetivos 1, SEDATU:</b> "Promover el ordenamiento y la planeación territorial como articuladores del bienestar de las personas y el uso eficiente del suelo", y</p> <p><b>Objetivo 2</b> "Incentivar el crecimiento ordenado de los asentamientos humanos, los centros de población y las zonas metropolitanas".</p> <p><b>Objetivos 2, SECTUR:</b> "Fortalecer las ventajas competitivas de la oferta turística", y</p> <p><b>Objetivo 5:</b> "Fomentar el desarrollo sustentable de los destinos turísticos y ampliar los beneficios sociales y económicos de las comunidades receptoras".</p> <p><b>Objetivo 1, SE:</b> "Desarrollar una política de fomento industrial y de innovación que promueva un crecimiento económico equilibrado por sectores, regiones y empresas".</p>	
--	--	--	---	--

Fuente: Elaboración propia, basado en el PECC 2013-2018.

De manera general, la política nacional está encaminada al fortalecimiento de la infraestructura estratégica, particularmente en prevenirla de los riesgos asociados a los desastres naturales que incluye sismos, tsunamis, erupciones volcánicas, entre otros, pero se destaca de manera particular en la prevención para resistir los daños que podrían provocar los fenómenos climáticos extremos en el país y su efecto en la infraestructura estratégica, productiva y de servicios.

## 3.2 Arreglos institucionales

Para una coordinación efectiva entre los diferentes niveles de gobierno, se integró el Sistema Nacional de Cambio Climático, el cual permite propiciar sinergias entre los actores involucrados para enfrentar de manera conjunta los riesgos que el cambio climático provoca. Uno de los actores clave es la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC).

La CICC es el mecanismo permanente de coordinación de acciones entre las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal en materia de cambio climático. Está integrada por 13 secretarías de estado [ENCC, 2013].

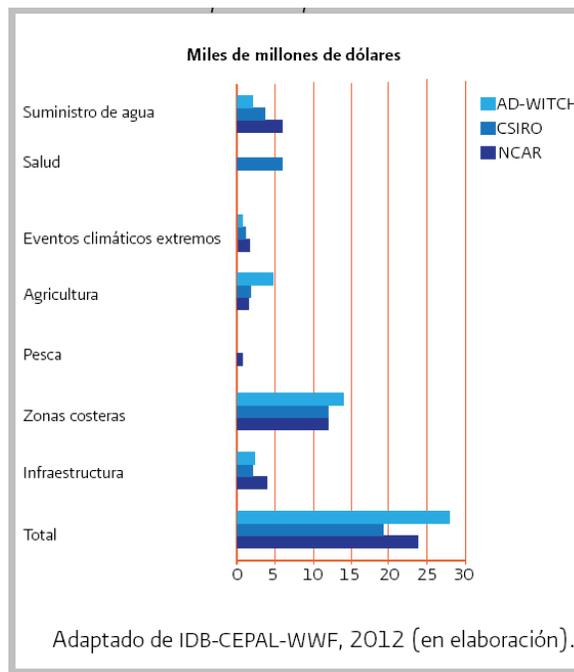
Para su desempeño la CICC integra grupos de trabajo sobre: mitigación, adaptación, el PECC, deforestación, negociaciones internacionales y reducción y captura de GEI.

El Grupo de Trabajo sobre políticas de adaptación (GT-ADAPT) tiene como objetivo coordinar y dar seguimiento a las acciones generadas por parte de las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal (APF), relativas a la instrumentación de la política nacional de adaptación al cambio climático y facilitar el diálogo transversal en la materia.

### 3.3 El costo de la adaptación en México

En México, de acuerdo a un trabajo realizado por la Comisión Intersecretarial el Cambio Climático (2012), existen estimaciones nacionales del costo económico que tendría el cambio climático si no se adoptaran medidas de adaptación y mitigación. De acuerdo con Galindo (2009), para el año 2050, el costo representaría aproximadamente 3.2% del PIB. Sin embargo, estudios más recientes indican que el costo acumulado del cambio climático para México en este siglo representará aproximadamente 6% del PIB, bajo cualquier escenario de emisiones (Estrada *et al.*, 2011).

Sin embargo, se requieren estimaciones a nivel sectorial y regional para avanzar en la toma de decisiones más efectiva sobre el tema. De esta manera el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), realizó estimaciones basadas en tres modelos para calcular los costos derivados de la adaptación al cambio climático por sector para Latinoamérica. La figura 8 muestra las estimaciones para la adaptación por sector.



**Figura 8. Estimación del costo anual de la adaptación por sector**

Fuente: Elaborado por la CICC, basado en: IDB-ECLAC-WWF, 2013.

### **3.4 Instrumentos de política de la APF vinculados con la adaptación al cambio climático.**

En la Administración Pública Federal (APF) en México, en los últimos años se han implementado una serie de programas que han coadyuvado a avanzar en los temas de adaptación al cambio climático, tales como:

- HABITAT, la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) a través de este programa financia obras para la mitigación de riesgos en zonas de pobreza de las ciudades del Sistema Urbano Nacional.
- Programa de Prevención de Riesgos en Asentamientos Humanos (PRAH), también de la SEDESOL, que desde el 2011 financia la elaboración de atlas de riesgos, así como la construcción de obra pública para la mitigación de riesgos de desastre.
- CADENA (componente de atención a desastres naturales en el sector agropecuario y pesquero), de la SAGARPA.
- Programa de urgencias epidemiológicas y desastres, de la Secretaría de Salud.

Existen otros instrumentos de la APF que se encuentran más relacionados con la infraestructura carretera y se describirán con mayor detalle a continuación.

#### **3.4.1 Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC)**

El Sistema Nacional de Protección Civil es un conjunto articulado de estructuras, relaciones funcionales, métodos y procedimientos que establecen las dependencias y entidades del sector público entre sí, con las organizaciones de los diversos grupos voluntarios, sociales, privados y con las autoridades de los estados y los municipios, a fin de efectuar acciones coordinadas, destinadas a la protección contra los peligros que se presenten y a la recuperación de la población, en la eventualidad de un desastre (Secretaría de Gobernación).

Para la atención de una emergencia, el auxilio a la población es una función prioritaria de la Protección Civil, de esta manera la atención conjunta y ordenada inicia con la atención de la emergencia con la autoridad que reciba conocimiento de la misma, prestando de manera inmediata atención e informando las instancias especializadas de protección civil.

La primera instancia de actuación especializada corresponde a la autoridad municipal. En caso de que ésta supere su capacidad de respuesta, acudirá a la instancia estatal correspondiente. Si ésta resulta insuficiente, se procederá a informar a las instancias federales correspondientes, quienes actuarán de acuerdo con los programas establecidos al efecto.

### **3.4.2 Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN)**

El FOPREDEN, a través de sus reglas de operación, se orienta a la acción preventiva bajo un enfoque de la gestión integral del riesgo, este instrumento tiene como objetivo fortalecer las iniciativas dirigidas a prevenir los desastres, buscando el aprovechamiento eficiente de los recursos financieros disponibles y potencializar los resultados, principalmente aquellos cuyo fin sea la preservación de la vida e integridad física de las personas, así como la de los servicios e infraestructura pública y el medio ambiente.

La gestión integral del riesgo, de acuerdo al FOPREDEN, se basa en una retroalimentación permanente del conocimiento de las amenazas naturales y las acciones pertinentes para reducir la vulnerabilidad de la infraestructura estratégica, entre otros aspectos, basados en tres principios:

- a) La reducción, previsión y control permanente y priorizado del riesgo de desastre.
- b) El combate a las causas estructurales de los mismos.
- c) El fortalecimiento de las capacidades de resiliencia.

La finalidad del FOPREDEN es financiar proyectos preventivos y proyectos preventivos estratégicos enfocados a la reducción de los riesgos que contribuyan a evitar o disminuir los daños originados por la presencia de fenómenos meteorológicos perturbadores. El Fondo tiene como base los siguientes ejes de acción:

- a) Conocimiento del origen y construcción social del riesgo.
- b) Identificación de peligros, vulnerabilidades, riesgos y sus escenarios.
- c) Análisis y evaluación de los posibles efectos.
- d) Acciones y mecanismos para la prevención y reducción de riesgos y mitigación de impactos.
- e) Desarrollo de una mayor comprensión y concientización de los riesgos.
- f) Fortalecimiento de la capacidad de resiliencia del gobierno y de la sociedad civil.

### **3.4.3 Fondo para la Atención de Emergencias (FONDEN)**

Es un instrumento financiero que busca responder de manera inmediata para proporcionar suministros para el auxilio y la asistencia de la población que se encuentra ante la inminencia o alta probabilidad de que ocurra un fenómeno natural perturbador, ya sea del tipo geológico, meteorológico o hidrometeorológico. Está a cargo de la Secretaría de Gobernación y se activa a través de la emisión de una declaratoria de emergencia. Los suministros se orientan a la protección de la vida y la salud de la población.

La declaratoria de emergencia es un acto donde se reconoce que uno o varios municipios se encuentran ante la inminencia o alta probabilidad de que se pueda propiciar un riesgo para la seguridad e integridad de la población. Esta declaratoria puede coexistir con la declaratoria de desastre natural.

Una vez decretada la declaratoria, se puede ser objeto de apoyo del Fondo, cuyos recursos provienen del Programa Fondo de Desastres Naturales y del Fideicomiso Fondo de Desastres Naturales.

La declaratoria de emergencia está dirigida a la atención de la vida y la salud de la población y la declaratoria de desastre tiene por objeto proporcionar recursos para la reconstrucción de los daños sufridos en las viviendas y la infraestructura pública.

Cuando un fenómeno natural perturbador impacte la infraestructura de transporte se podrá acceder a los recursos del FONDEN con el objeto de mitigar los efectos que produzca el fenómeno, para ello se requiere que la dependencia federal en conjunto con la entidad federativa corroboren el fenómeno natural perturbador y posteriormente la solicitud de Declaratoria de Desastre Natural. En paralelo la dependencia federal se debe trabajar en la cuantificación y evaluación de los daños para elaborar un diagnóstico preliminar de obras y acciones requeridas y, posteriormente, un diagnóstico final definitivo que incluya la solicitud global de los recursos. La solicitud debe incluir el compromiso de asegurar los bienes en los programas y presupuestos subsecuentes. En caso de daños a la infraestructura federal que se encuentre asegurada, la dependencia sólo podrá solicitar acceso a los recursos del FONDEN por la diferencia entre la suma asegurada y el monto total de los daños una vez que la primera haya sido agotada.

De acuerdo al FONDEN, en la recuperación de infraestructura es posible incluir acciones para aumentar su resiliencia, esto de acuerdo al numeral 20, el cual indica que “Identificar de manera clara las medidas de mitigación para daños futuros, así como la validación de los argumentos técnicos que las justifican”, aunque el numeral 24 lo revierte “La reconstrucción o restitución de los daños tendrá como propósito dejar a los bienes afectados en condiciones operativas similares a las que prevalecían antes del Desastre Natural”; sin embargo, en el Anexo 5 de los lineamientos permite excepciones tales como “...exceptuando aquellos casos en los que resulten indispensables mejoras mínimas para asegurar la viabilidad de la acción de restauración”.

Con cargo al FONDEN se podrán otorgar apoyos para desarrollar una estrategia de gestión integral de riesgos, con el compromiso de adquirir el instrumento de administración y transferencia de riesgos, cubriendo hasta un 70% del porcentaje del costo total de las estrategias, las cuales pudieran ser: identificar la totalidad de los bienes bajo su responsabilidad que sean susceptibles de recibir apoyo del FONDEN, identificar los riesgos a los que están expuestos los bienes, implementar el esquema de administración y transferencia de riesgos.

La infraestructura pública no asegurada puede recibir apoyos del FONDEN hasta un 100% la primera ocasión, 50% la segunda ocasión, 25% la tercera ocasión, a partir de la cuarta ocasión no se otorgará apoyo alguno.

### **3.4.4 Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT-CT)**

El objetivo del SIAT-CT es ser un mecanismo de alertamiento y coordinación que de manera consensuada genere una respuesta organizada del Sistema Nacional de Protección Civil a la amenaza que constituye un ciclón tropical, mitigando los efectos de este agente perturbador.

El SIAT-CT se basa en dos tablas de alertamiento que consideran los siguientes parámetros:

- Intensidad del ciclón tropical según la escala Saffir-Simpson.
- Intensidad del ciclón tropical según la escala de Circulación.
- Velocidad de traslación del ciclón tropical.
- Distancia del ciclón con respecto a la costa nacional o área afectable.
- Tiempo estimado de llegada del ciclón a la costa nacional o área afectable.

Se considera que el Sistema de Alerta Temprana está en esta fase cuando el ciclón se encuentra aproximándose a territorio nacional o acercándose a un área afectable. El sistema de alertamiento considera 5 etapas:

- Alerta azul (aviso). Peligro mínimo de acercamiento/alejamiento.
- Alerta verde (prevención). Peligro bajo de acercamiento/alejamiento.
- Alerta amarilla (preparación). Peligro moderado de acercamiento/alejamiento.
- Alerta naranja (alarma). Peligro alto de acercamiento/alejamiento.
- Alerta roja (afectación). Peligro máximo de acercamiento/alejamiento.

A partir de la alerta naranja se implementan acciones para asegurar la operatividad de la red de carreteras, mediante el despliegue táctico del personal y recursos materiales de las instancias participantes de los ámbitos federal, estatal y municipal y el resguardo de los recursos materiales que serán utilizados para la rehabilitación de los sistemas afectados.

### **3.4.5 Estrategia Nacional de Mitigación del Riesgo por Inestabilidad de Laderas**

La inestabilidad de una ladera provoca el movimiento pendiente abajo de suelos, rocas y vegetación bajo la influencia de la gravedad. Los materiales se mueven a través de diferentes mecanismos: caídos o derrumbes, deslizamientos y flujos.

La Estrategia Nacional de Prevención y Mitigación del Riesgo por Inestabilidad de Laderas (MILADERA), es financiada por el CENAPRED y forma parte de un programa especial de prevención de desastres naturales.

La inestabilidad de laderas, cuyas manifestaciones son denominadas desprendimientos, desgajamientos o desplazamientos de tierra, lo cuales provocan, entre otras cosas, la obstrucción de vías de comunicación, tales como carreteras y vías férreas.

El régimen hidrológico provoca reblandecimiento y disminución de la resistencia del suelo, y si a ello se suma la deforestación, la probabilidad de que ocurran más deslizamientos incrementa.

De acuerdo a Alcocer (2004), la primera etapa de la estrategia buscó entender la ocurrencia en términos de mecánica, de distribución espacial dentro del territorio nacional, de frecuencia e intensidad y, a partir de ello, establecer metodologías para medir el peligro en un contexto específico, donde existan poblaciones o infraestructura por proteger.

El siguiente paso fue crear mapas de riesgo para establecer políticas y mitigar efectos, como la construcción de barreras de protección o, incluso, la reubicación de zonas habitadas.

El proyecto MILADERA contempló el diseño y aplicación de técnicas para el control de la filtración y minimizarla mediante capas vegetales. Además del mapeo de geología superficial y edafología de zonas críticas se muestra la regionalización y micro regionalización de áreas susceptibles de enfrentar inestabilidad y el uso de percepción remota e interferometría de radar para casos especiales, para tomar decisiones en tiempo real. MILADERA sugiere también la instrumentación de algunas laderas, mediante la colocación de sensores y su conexión a alarmas, tanto para habitantes como autoridades.

### **3.4.6 Boletines meteorológicos marítimos**

Los boletines meteorológicos, conocidos como “Derrotero Meteorológico”, son documentos que emite la Secretaría de Comunicaciones y Transportes a través de la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, donde se informa sobre el estado de los fenómenos meteorológicos que puedan estar afectando a cualquiera de dichos litorales, contienen información sobre las condiciones operacionales y de navegación de los puertos mexicanos.

Se emite uno por cada litoral del país: Pacífico Mexicano, Golfo de México y el Mar Caribe, dos veces al día durante los 365 días del año a las 10:00 hrs. y a las 16:00 hrs.

La información tiene un enfoque para la navegación marítima y para la operación de los puertos, sin embargo, es muy útil para la informar sobre las condiciones climáticas en las carreteras costeras.

De igual manera, la Secretaría de Marina, a través del Centro de Análisis y Pronóstico Meteorológico Marítimo, emite el pronóstico meteorológico marítimo para el Océano Pacífico, para el Golfo de México y el Mar Caribe.

### **3.4.7 Servicio Meteorológico Nacional**

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en el país. El Servicio Meteorológico Nacional depende de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual forma parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Los objetivos del SMN se concentran en la vigilancia continua de la atmósfera para identificar los fenómenos meteorológicos que pueden afectar las distintas actividades económicas y, sobre todo, causar la pérdida de vidas humanas.

Sus funciones principales son:

- Mantener informado al Sistema Nacional de Protección Civil de las condiciones meteorológicas que puedan afectar a la población y a sus actividades económicas.
- Difundir al público boletines y avisos de las condiciones del tiempo, especialmente durante la época de ciclones, que abarca de mayo a noviembre.
- Proporcionar al público información meteorológica y climatológica.
- Realizar estudios climatológicos o meteorológicos.
- Concentrar, revisar, depurar y ordenar la información generando el Banco Nacional de Datos Climatológicos para consulta del público.

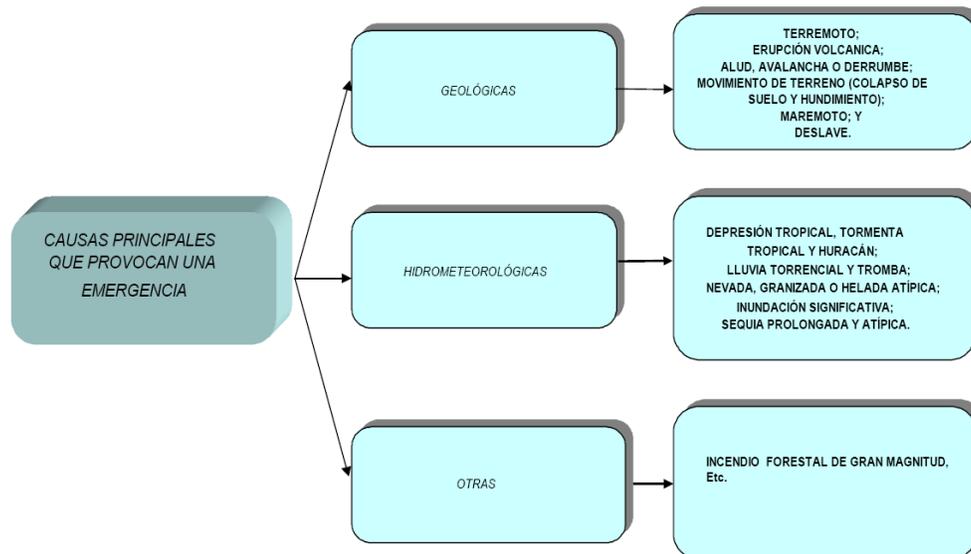
A través de los 79 observatorios meteorológicos, 16 estaciones de radiosondeo, 13 radares meteorológicos, imágenes del satélite meteorológico GOES-8, así como de 188 Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) y 90 Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automáticas (ESIME's), se pueden realizar pronósticos climáticos basados en los diferentes modelos existentes, aunque no se han realizado específicamente para el sector transporte.

Adicionalmente, la CONAGUA cuenta con planes de contingencia por sequía formulados para cada organismo de cuenca, con el Programa de protección a centros de población y con el Inventario nacional de obras de protección contra inundaciones en cauces naturales realizado en el año 2008.

### 3.4.8 Guía para la atención de emergencias en carreteras y puentes

Con el objetivo de incrementar su capacidad de prevención y mitigación que causan a la red federal de carreteras los fenómenos meteorológicos extremos, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en el año 2013 editó una guía para atender las emergencias que se puedan presentar en las carreteras y sus puentes, de tal manera que los tramos carreteros afectados se puedan restituir en los menores tiempos posibles y mantener la operación fluida del tránsito.

Los fenómenos naturales que han impactado y sobre los cuales se centra la Guía de la SCT se muestran en la figura 9.



**Figura 9. Causas principales de emergencias en carreteras en México**

Fuente: SCT, 2013.

El objetivo principal es “restablecer de manera inmediata, la comunicación terrestre que permita el flujo de bienes y servicios, a la población que haya sido afectada”. Esto se pretende a través de un procedimiento para enmarcar las acciones antes de la emergencia, durante la emergencia y después de la emergencia (restablecer el servicio provisionalmente y reconstruir la obra dañada).

*a) Acciones que deben emprenderse antes de la emergencia*

Fortalecer la capacidad de los Centros SCT para responder de manera inmediata a las contingencias ocasionadas por eventos naturales de gran magnitud.

*b) Acciones que deben emprenderse durante la emergencia.*

Consolidar estrategias para enfrentar los daños que se presenten en los tramos carreteros, a fin de adoptar las medidas pertinentes para atenderlos y superarlos de inmediato.

*c) Acciones que deben emprenderse después de la emergencia.*

Restablecer la comunicación, es decir, dar paso en forma provisional y en el menor tiempo posible.

*d) Seguimiento de emergencias.*

Mensualmente, los Centros SCT informarán a la Dirección General de Conservación de Carreteras acerca de los daños que sufra la Red Federal Carretera originados por fenómenos perturbadores.

La Guía, adicionalmente, cuenta con diagramas para hacerse llegar recursos del FONDEN, así como las especificaciones técnicas de diferentes medidas para restablecer la operación de las carreteras, tales como puentes provisionales. Cada acción de levantamiento de daños es registrada a través de diversos formatos, los cuales son incluidos en bases de datos y georreferenciados los daños.

### **3.5 Comentarios sobre las políticas nacionales**

De la misma manera que el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, en México se ha abordado el sector transporte con mayor énfasis en la mitigación, a partir de esto se han desarrollado un importante número de estudios e implementado diversas acciones; sin embargo, los trabajos realizados sobre impactos, vulnerabilidades y acciones de adaptación en los sistemas de transporte son mínimos.

La consideración de que el transporte es casi en todos los países el mayor generador de GEI, ha traído consigo que la mayor parte de los esfuerzos internacionales se centren en la mitigación, repercutiendo en una falta de conocimiento para las estrategias de adaptación al cambio climático para la infraestructura del transporte.

El marco normativo actual no impulsa el desarrollo de acciones específicas para cada sector, de tal manera que se genere más conocimiento a través de estudios e investigaciones que permitan conocer la vulnerabilidad de la infraestructura carretera, los impactos que los fenómenos climáticos extremos tienen sobre la infraestructura, los impactos económicos que representan para el país, la implementación de acciones de adaptación, la generación de catálogos sobre las mejores prácticas, etc.

De acuerdo con la Comisión Intersecretarial el Cambio Climático (2012), es importante que se integren criterios de adaptación en los instrumentos de planeación del desarrollo económico; por ejemplo, que el diseño de la infraestructura que se va a construir, en particular aquella con una vida de largo plazo, parta de información sobre impactos y adaptación al cambio climático. Es importante orientar las tendencias de desarrollo de infraestructura hacia esquemas de eco-eficiencia y sustentabilidad.

## 4 Metodologías para la adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera

---

La adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera se ha abordado de múltiples formas en diversos países, de tal manera que adoptar y extraer las mejores prácticas sobre las metodologías, herramientas o métodos utilizados para la adaptación puede resultar complejo.

Existen principalmente dos enfoque metodológicos *top-down* y *bottom-up*, el primero de ellos “arriba hacia abajo” parte del uso de mapas/escenarios climáticos que al superponerse a la red de carreteras se pueden identificar los sitios vulnerables de la red (figura 10), y con base a dichos impactos se pueden establecer respuestas para la adaptación.



**Figura 10. Enfoque para la adaptación de arriba hacia abajo**

Fuente: Elaboración propia.

El segundo enfoque de “abajo hacia arriba” evalúa directamente a la infraestructura carretera y a través de datos históricos registrados (eventos climáticos o impactos climáticos) se pueden establecer las vulnerabilidades de los sitios y los activos y, con base en los resultados, proponer acciones de adaptación (figura 11).



**Figura 11. Enfoque para la adaptación de abajo hacia arriba**

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, la gama de metodologías es muy diversa, aunque no muy amplia, por lo que a continuación se muestra un esfuerzo del autor principal del presente documento para englobar y clasificar las metodologías para la adaptación.

## 4.1 Perspectivas metodológicas para la adaptación

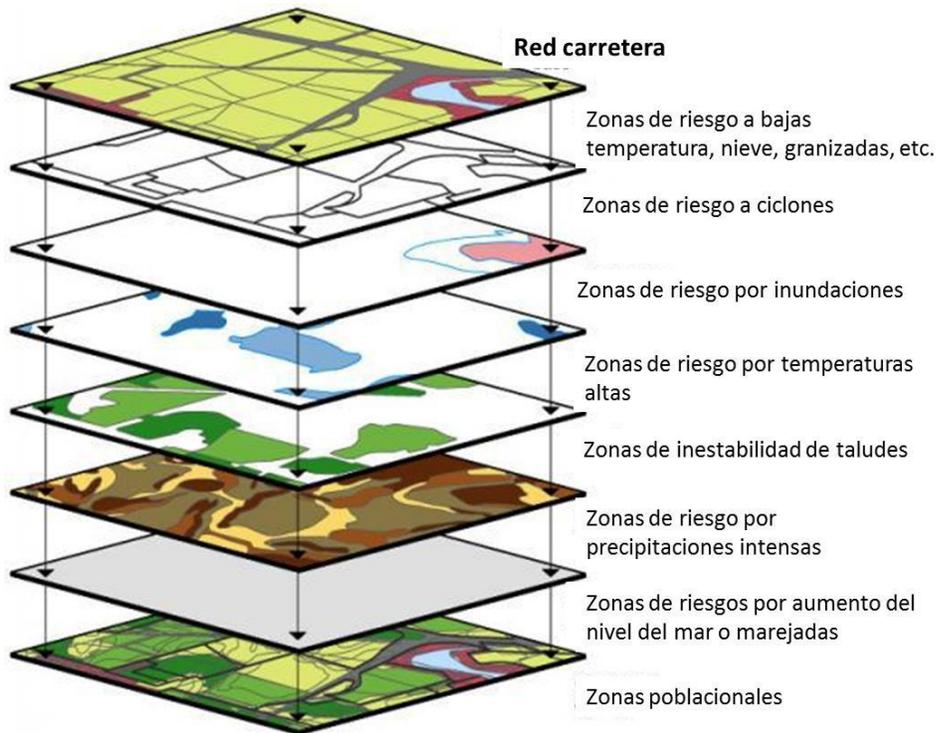
El primer grupo se denomina “iniciativas para la adaptación al cambio climático”, en el cual podemos incluir las políticas nacionales que diversos países han implementado, donde el transporte y su infraestructura han sido identificados como prioridad para desarrollar acciones para aumentar la resiliencia de los sistemas de transporte.

Sólo por mencionar unos ejemplos, el Gobierno de Canadá en el año 2014 publicó su programa para la adaptación al cambio climático (GOC, 2004). En dicho programa se hace un análisis de los principales impactos del cambio climático sobre la infraestructura carretera y su operación, y cuáles serán las acciones de adaptación prioritarias. El Reino Unido, en el año 2000, publicó las estrategias para la adaptación al cambio climático (DETR, 2000), donde presenta 5 aspectos importantes para implementar respuestas potenciales para la adaptación, destacando las acciones para la infraestructura carretera, donde se buscará que los nuevos diseños de infraestructura y la existente cuente con criterios climáticos.

Debido a que los impactos del cambio climático son diferentes en cada región, cada país tendrá que hacer un análisis de los impactos que el clima ha provocado en su infraestructura carretera y su operación, para que con base en ello se puedan establecer políticas nacionales para la adaptación.

De esta manera, se han compilado un importante número de acciones de adaptación que muchos países pueden replicar, aunque carecen de un contexto metodológico para asegurar la confiabilidad de los resultados. Un compendio del estado del arte sobre las buenas prácticas de adaptación se presenta en el siguiente capítulo.

Un segundo grupo de metodologías que se están aplicando a nivel país, es el uso de la superposición de mapas (Figura 12), donde los mapas pueden ser de sitios de riesgos de fenómenos climáticos basados en registros históricos o también en mapas que incluyan pronósticos climáticos de temperatura o precipitación, en donde al superponer las capas sobre la red de carreteras se pueden identificar los activos que podrían estar vulnerables ante los diferentes fenómenos climáticos. Esta metodología es útil para asegurar la resiliencia de la infraestructura si se aplicaran acciones de adaptación en un corto plazo con base en registros históricos y, en un largo plazo, si se utilizan proyecciones de clima bajo los diferentes escenarios del IPCC a pesar de las incertidumbres existentes. Este grupo se denominará “metodologías basadas en herramientas”.



**Figura 12. Superposición de mapas para identificación de sitios para la adaptación**

Fuente: Adaptado de CASA, 2013.

Bhamidipati (2014), establece que para identificar las partes vulnerables de un sistema de transporte se requiere establecer el modelo básico de la red de transporte e incorporar el modelo del clima, al vincularlos se podrían identificar las afectaciones de la red, aunque no es fácil predecir la ocurrencia de los eventos climáticos, ni el tamaño ni la ubicación exacta y la duración; sin embargo, es un modelo interesante y proactivo para la adaptación.

Los modelos de superposición de mapas pueden simular diferentes eventos climáticos que, de acuerdo a los umbrales establecidos, pueden afectar la operación de la red e impactar los tiempos de viaje debido, por ejemplo, a un cambio de ruta, esto cuando la ruta más corta se encuentra inundada por ejemplo.

Al incluir el evento climático, el tamaño del evento climático y su ubicación en la red, éste es capturado en la simulación. El tamaño del evento es evidentemente importante para la evaluación de daños por parte del administrador de la red de carreteras y la ubicación del evento es igualmente importante para entender la magnitud del daño.

De esta manera Schweikert *et al.* (2014), desarrollaron un software denominado “*Infrastructure Planning Support System (IPSS)*”, cuyo modelo permite integrar el fenómeno climático a través de capas y la red infraestructura de transporte, a través de los cuales se pueden determinar los impactos del cambio climático y el costo de no adaptar la infraestructura.

Este tipo de metodologías permite a los tomadores de decisiones determinar las estrategias para la adaptación, considerado lo impactos del cambio climático con beneficios a largo plazo.

Un tercer grupo para abordar la adaptación de infraestructura es a través procesos donde, a través de etapas, los administradores de carreteras pueden evaluar la red carretera para identificar la vulnerabilidad de sus activos a partir de su grado de exposición y sensibilidad, y posteriormente evaluar la probabilidad y severidad del impacto; finalmente, se definen las estrategias de adaptación y se priorizan estas respuestas. Este grupo se denominará “metodologías para tomadores de decisiones”.

En el año 2015, la Asociación Mundial de Carreteras (identificada por su acrónimo original PIARC o AIPCR, en inglés o español) desarrolló un enfoque integral para evaluar la infraestructura carretera mediante el “Marco Internacional para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático”, mismo que pretende ser una guía para las autoridades de carreteras, mediante el cual puedan identificar los riesgos asociados al cambio climático, evaluar la vulnerabilidad de los elementos, establecer acciones de adaptación y priorizar los trabajos, para que los organismos operadores de carreteras puedan integrar las acciones de adaptación dentro de sus programas de trabajo [PIARC, 2015].

Este grupo de metodologías continua teniendo un enfoque de arriba hacia abajo para identificar la vulnerabilidad de la infraestructura, aunque es posible ajustar la etapa de identificación con un enfoque de abajo hacia arriba. Otros ejemplos asociados a este grupo es el Marco y Estrategia de Adaptación de la Agencia de Carreteras del Reino Unido (2012) y el Marco de Evaluación de la Vulnerabilidad ante el Cambio Climático y Clima Extremo de la Administración Federal de Carreteras (2012).

El cuarto grupo de metodologías es aquel que se apoya en diferentes técnicas tales como, grupos ad-hoc, redes causa-efecto, listas de verificación, entre otras, mediante las cuales los ingenieros de carreteras identifican, bajo criterio experto, los riesgos probables que el cambio climático tendrá sobre los activos carreteros. El *expertise* de los ingenieros de carreteras es básico para la identificación de vulnerabilidades, pero estos deben capacitarse en temas de cambio climático para que aplicando técnicas puedan ser asertivos en la selección de los elementos de riesgos en el activo carretero. Este grupo se denominará “metodologías basadas en criterio experto”.

El último grupo descrito ha llevado a generar un compendio importante de las buenas prácticas de adaptación, de las cuales muchas de ellas se detallan en el siguiente capítulo. De esta manera, cada riesgo identificado en la infraestructura carretera es observado contra los fenómenos climáticos que lo han impactado y auxilia a determinar qué sucedería si se vuelve a presentar, evaluando así su vulnerabilidad y proponiendo respuestas óptimas para la adaptación de los diferentes elementos de la infraestructura carretera. Este enfoque es visto desde abajo hacia arriba, ya que al concluir con la identificación de acciones, éstas pueden ser agrupadas en paquete para que se integren a los programas de conservación de los organismos operadores de carreteras.

Cada una de las perspectivas metodológicas pueden ser adaptadas para utilizarse solas o combinadas, de tal manera que -de acuerdo a la disponibilidad de información- cada país pueda elegir una u otra metodología.

## **4.2 Metodologías para la adaptación**

La revisión de las metodologías para la presente investigación no es una búsqueda exhaustiva, sino una descripción de las mejores prácticas que son referenciadas en múltiples documentos a nivel internacional.

Cada una de las metodologías será agrupada de acuerdo a las perspectivas en las que se abordaron en el apartado 4.1.

## 4.2.1 Iniciativas para la adaptación al cambio climático basadas en políticas nacionales

Como se comentó anteriormente este grupo comprende políticas nacionales que diversos países han implementado, por lo que se comentan adicionalmente el caso de los Estados Unidos y de Colombia que son específicas para carreteras.

### 4.2.1.1 Plan de Adaptación al Cambio Climático del US DOT

El Departamento de Transporte de los Estados Unidos (US DOT, por sus siglas en inglés) integró en su Plan de Adaptación al Cambio Climático (2014) la consideración de los impactos climáticos y la adaptación en la planificación, operaciones, políticas y programas, para asegurar que los recursos de los contribuyentes se inviertan sabiamente y que la infraestructura, servicios y operaciones de transporte continúen siendo efectivos en las condiciones climáticas actuales y futuras.

El plan aborda tres acciones principales que se indican a continuación:

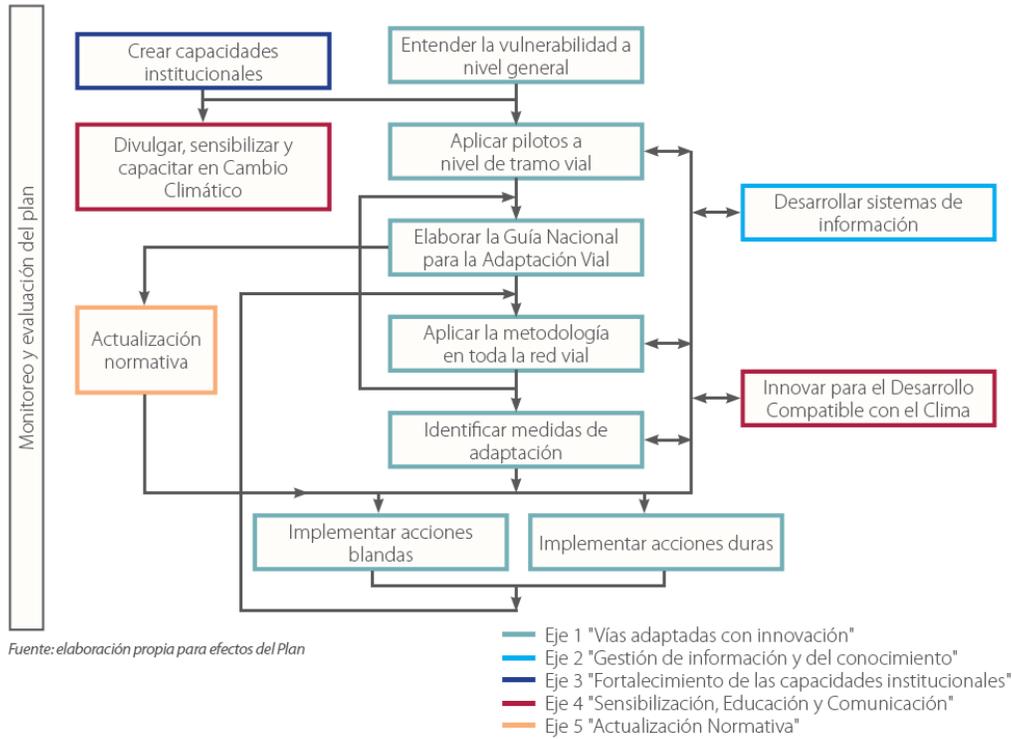
**Planificación.** El US DOT tomará medidas para asegurar que las decisiones federales de inversión en transporte aborden los potenciales impactos climáticos en los procesos de planificación de transporte y desarrollo de proyectos en todo el estado y áreas metropolitanas, según proceda, a fin de proteger las inversiones federales. A través de estas acciones, los sistemas de transporte estarán mejor preparados para los futuros cambios climáticos.

**Gestión de activos.** El US DOT trabajará para incorporar la variabilidad del clima y las consideraciones del impacto de cambio en la gestión de activos. Por ejemplo, las administraciones modales trabajarán con los concesionarios para asegurar que los impactos potenciales se incorporen a los sistemas existentes de gestión de activos del concesionario. Las agencias evaluarán la política, las guías, las prácticas y las medidas de desempeño de sus programas de administración de activos para incorporar tales consideraciones.

**Herramientas.** El US DOT proporcionará herramientas, estudios de caso, mejores prácticas para incorporar las consideraciones climáticas en la toma de decisiones de transporte.

### 4.2.1.2 Vías compatibles con el Clima de Colombia

El Plan Vía-CC (2014), se basa en los conceptos de vulnerabilidad y riesgo, los cuales son los elementos de entrada para encarar los desafíos actuales y futuros que la red carretera presenta ante el cambio climático. Estos conceptos han permitido definir la estrategia del sector carretero en Colombia (ver figura 13).

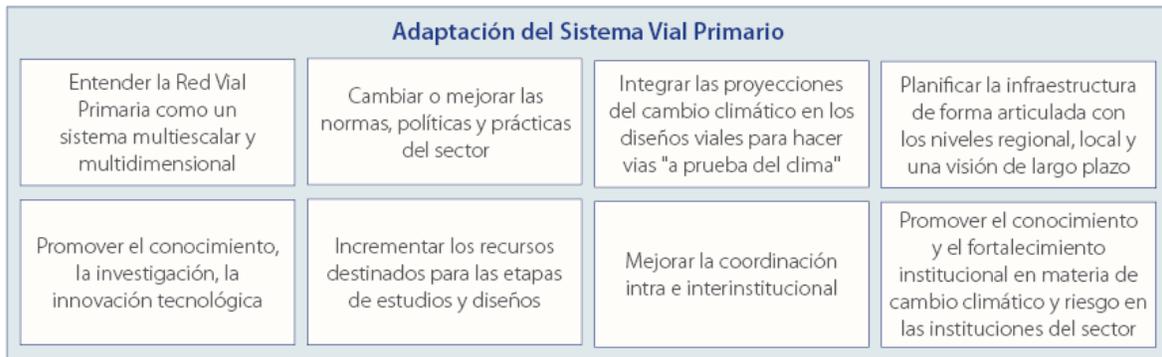


**Figura 13. Esquema general del Plan Vía-CC**

Fuente: Plan Vía-CC, 2014.

El Plan VÍAS-CC impulsa una visión de competitividad y desarrollo compatible con el clima en el sector vial y de transporte (MTC, 2014). La estrategia cuenta además con cinco ejes transversales.

La principales acciones para tener en cuenta para la adaptación del sistema vial primario de Colombia se muestra en la figura 14.



**Figura 14. Acciones para adaptar el sistema vial primario de Colombia**

Fuente: Plan Vía-CC, 2014.

El Plan VÍAS-CC se concentra en la adaptación de la red vial primaria por considerarla estratégica para el desarrollo económico y social del país, y será el punto de partida para continuar trabajando con las regiones e innovando en la adaptación para los otros modos de transporte.

## **4.2.2 Metodologías basadas en herramientas**

En este apartado se describe diversas metodologías útiles para la identificación de impactos del cambio climático, incluso con ellas es posible hacer aproximaciones de la evaluación del daño para cuantificar los costos al no adaptar la infraestructura carretera al cambio climático.

### **4.2.2.1 El Sistema de Apoyo a la Planificación de la Infraestructura**

El Sistema de apoyo a la planificación de la infraestructura (IPSS, por sus siglas en inglés) es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, diseñada para que los planificadores de infraestructura y los responsables de la formulación de políticas puedan ampliar el criterio y los métodos de análisis en la inversión en transporte por carretera. Fue desarrollado por el Grupo de Investigación en Sistemas Civiles y Clima de la Universidad de Colorado.

El análisis en términos del cambio climático, IPSS cuenta con herramientas disponibles para analizar los impactos del cambio climático en la infraestructura carretera en cualquier región geográfica del mundo, basados en diversos modelos climáticos. IPSS también incorpora los costos que incurriría al reparar el daño ocasionado por eventos climáticos extremos en la infraestructura carretera, basados en ingeniería (IPSS, 2014).

IPSS puede apoyar a los tomadores de decisiones para proteger su infraestructura crítica, proporcionando certidumbre a las inversiones y asegurando una resiliencia en el largo plazo.

### **4.2.2.2 Modelo dinámico Estresor-Respuesta**

La metodología de estresor-respuesta son modelos basados en ingeniería que se utilizan como fundamento para estimar el impacto que provocan los factores de estrés climático en la infraestructura carretera. A través de estos modelos se introducen funciones de estrés-respuesta que cuantifican el impacto en el costo de un factor de estrés específico basado en la intensidad del estresor y el tipo de infraestructura que está afectando (Chinowsky y Arndt, 2012).

Los impactos del cambio climático se cuantifican en términos del total de kilómetros degradados antes de lo diseñado dentro de su ciclo de vida y el costo total de reparación o mitigación de daños futuros. La metodología estresor-respuesta evalúa el efecto que un factor exógeno tiene directamente en el elemento, tales como el pavimento o la terracería de una carretera no pavimentada. Los factores exógenos, asociados al cambio climático, pueden ser cambios en los niveles de precipitación, temperaturas, frecuencia e intensidad de las tormentas y velocidades del viento.

La respuesta de los materiales o elementos de la carretera se determinan de análisis realizados en estudios previos, en información de los fabricantes o extrapolando datos de casos de estudios similares. Los costos de construcción y mantenimiento de carreteras se determinaron utilizando tanto bases de datos del organismo de carreteras de acuerdo a los costos comerciales específicos de cada país.

Es importante señalar que los diferentes tipos de carreteras se tratan de forma homogénea al determinar los impactos del clima en el inventario de carreteras. Aunque existen diferencias en los estándares de calidad, mantenimiento y construcción dentro del país, estas diferencias de micro-nivel están fuera del alcance en la aplicación de esta metodología. Esta perspectiva se utiliza a nivel macro para evaluar redes a nivel país, aunque pueden examinarse contextos más específicos.

Los impactos de estresores relacionados con el cambio climático y el ahorro de mantenimiento se evalúan en este tipo de metodologías bajo un umbral de transitabilidad especificado por la organización de carreteras. El logro de este objetivo puede requerir un cambio en el estándar de diseño para nueva construcción o un aumento/disminución en el mantenimiento de la infraestructura existente.

En los escenarios "sin adaptación", no se toman medidas para mitigar los efectos del cambio climático en carreteras. Los escenarios con adaptación entienden que los patrones de precipitación cambian y las necesidades de mantenimiento aumentan, ya que las carreteras no están diseñadas para soportar los cambios en estos factores de estrés. Por el contrario, en la adaptación, las carreteras se construyen según normas de diseño que anticipan el cambio climático basado en las tendencias climáticas.

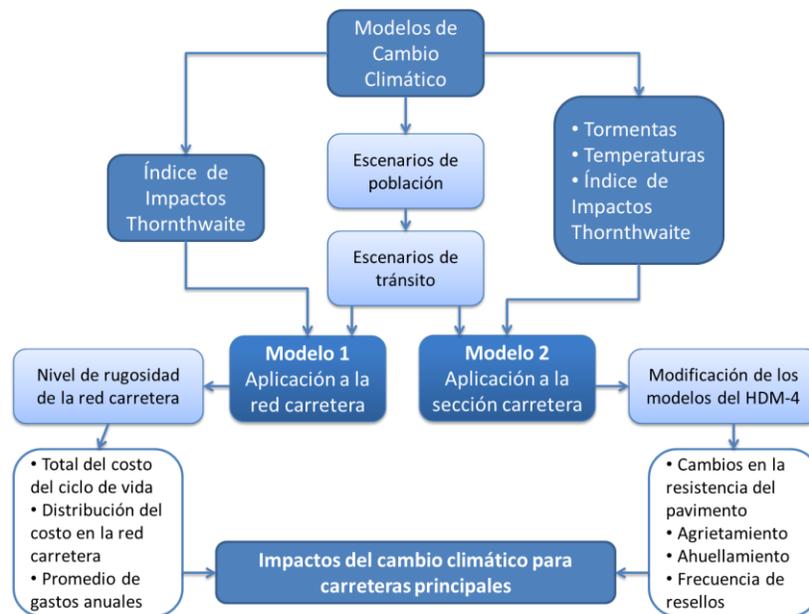
Las relaciones de estresor-respuesta se evalúan en un primer conjunto de simulaciones, estimando los costos de mantener una red de carreteras dada en todos los escenarios de cambio climático en relación con el escenario climático de referencia. En el segundo conjunto de simulaciones, el presupuesto para la construcción y mantenimiento de carreteras se mantiene constante en todos los escenarios de cambio climático. Estas simulaciones se ejecutan con y sin adaptación.

Los resultados permiten determinar los costos de no adaptar la red de carreteras al cambio climático, integrando una visión para la evaluación económica de los efectos del cambio climático sobre la infraestructura.

#### 4.2.2.3 Modelos de pronósticos del clima

AUSTROADS, la cual es una asociación de autoridades de transporte por carretera y tránsito de Australia y Nueva Zelanda, en el 2004 realizó un ejercicio basado en mapas climáticos con pronósticos para los próximos 100 años, para evaluar el impacto del cambio climático en la infraestructura y la operación del transporte.

Algunos objetivos del proyecto fueron: realizar el modelado climático, examinar las implicaciones de la infraestructura carretera principal, etc. El esquema del proyecto se muestra a continuación (ver figura 15).



**Figura 15. Estructura del proyecto de AUSTROADS**

Fuente: Elaboración propia, basada en AUSTROADS, 2004.

Los resultados permitieron obtener que, para la operación del transporte carretero de acuerdo a los pronósticos, el futuro de la demanda de mercancías por carretera es la variable más importante para evaluar el futuro de los costos de mantenimiento, particularmente el promedio de ejes equivalentes (ESAL's, por sus siglas en inglés) se duplicará, debido a que habrá una mayor masa por eje por los cambios de temperatura. Los costos de operación de los usuarios incrementarán por el crecimiento del tránsito, pero también por los incrementos de la temperatura.

Otro resultado refleja que los gastos de mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos incrementará en el futuro por los efectos del cambio climático, cuyos impactos aceleran las tasas de deterioro del pavimento.

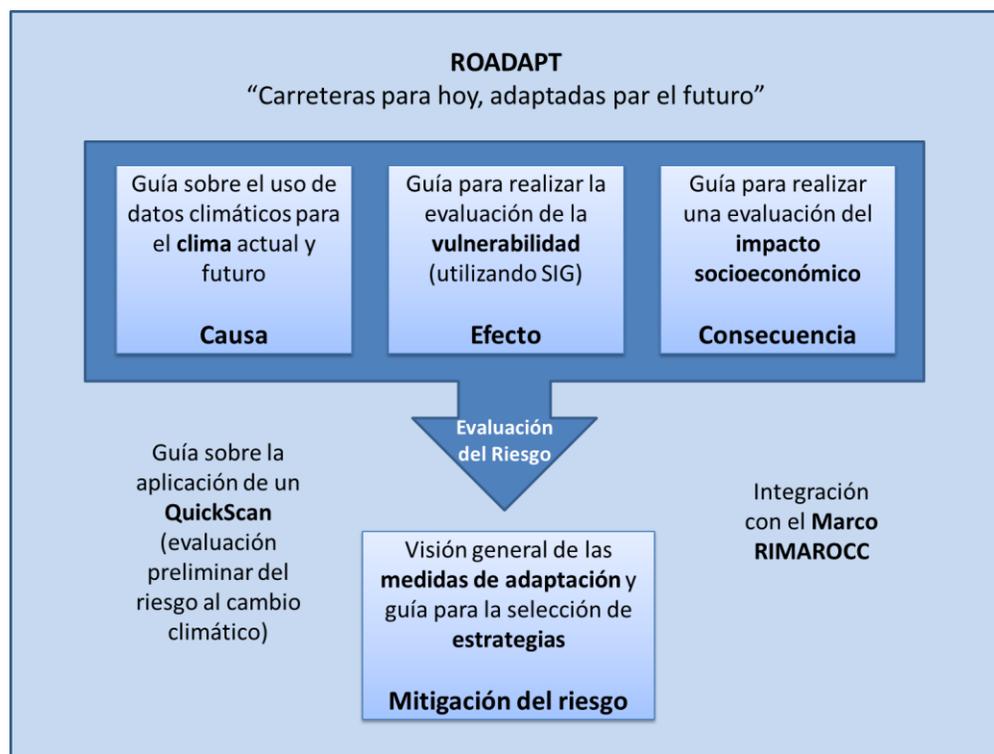
#### 4.2.2.4 ROADAPT

El proyecto ROADAPT nace en el año 2012 como una respuesta de los organismos propietarios de carreteras para adaptarlas al cambio climático, priorizar las medidas de adaptación y maximizar los recursos disponibles.

ROADAPT es un método práctico y útil para propietarios y operadores de carreteras, conformado por diferentes partes:

- a) Guía sobre el uso de datos climáticos para el clima actual y futuro.
- b) Guía sobre la aplicación de un QuickScan sobre los riesgos del cambio climático en las carreteras.
- c) Guía sobre cómo realizar una evaluación detallada de la vulnerabilidad.
- d) Guía sobre cómo realizar una evaluación del impacto socioeconómico.
- e) Guía sobre cómo seleccionar una estrategia de adaptación.

La estructura de ROADAPT se muestra en la siguiente figura 16.



**Figura 16. Estructura de las Guías de ROADAPT**

Fuente: Elaboración propia, basada en CEDR, 2015.

Un trabajo interesante es la integración de guías útiles de aplicar con el enfoque de RIMAROCC (*Risk Management for Roads in a Changing Climate* o Gestión de Riesgos para Carreteras en un Clima Cambiante).

Dentro de las directrices de ROADAPT, se introduce otro esquema que visualiza todos los aspectos básicos que deben considerarse en una evaluación del riesgo de cambio climático. El marco de RIMAROCC es un Método basado en diferentes "bloques de construcción" que pueden ser actualizados o cambiados de manera eficiente en una situación específica. Esto permite que las pautas ROADAPT sean conectadas al marco RIMAROCC, proporcionando un enfoque integrado ROADAPT-RIMAROCC.

### **4.2.3 Metodologías para tomadores de decisiones**

Algunos gobiernos y organizaciones han diseñado sus propias metodologías para la identificación de impactos del cambio climático, pero particularmente centradas en la gestión de los riesgos o sitios vulnerables identificados. El análisis y uso de esas metodologías son muy útiles para los países para comenzar a evaluar la vulnerabilidad de sus sistemas carreteros.

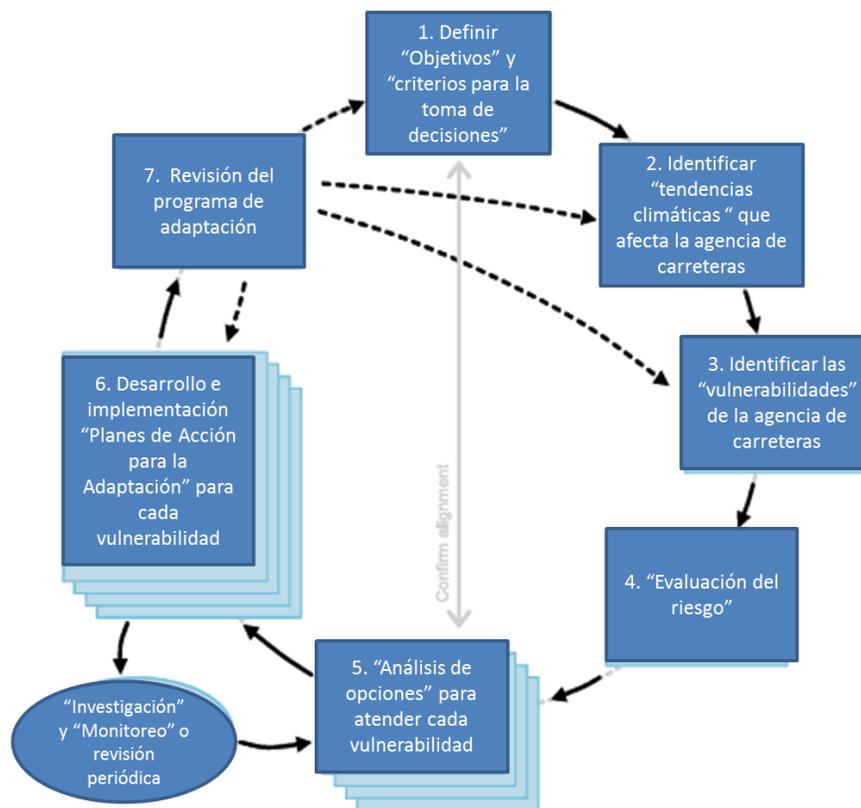
A continuación se resumen alguno de ellos.

#### **4.2.3.1 Marco y Estrategia de Adaptación de la Agencia de Carreteras del Reino Unido**

El Marco y Estrategia de Adaptación de la Agencia de Carreteras del Reino Unido, es un modelo que permite de manera sistemática desarrollar e implementar respuestas para enfrentar los retos que el cambio climático está teniendo sobre la infraestructura carretera.

El Marco de adaptación del Reino Unido provee una plataforma para los tomadores de decisiones para que puedan examinar de manera individual cada área, incluyendo normativas, especificaciones, mantenimiento y la operación de la red de la agencia de carreteras. El Marco provee un proceso para identificar las actividades que podrían verse afectadas por el cambio climático, determinar los riesgos (y oportunidades) e identificar las opciones para atenderlas. La figura 17 muestra esquemáticamente el modelo.

La evaluación del riesgo ha permitido priorizar las vulnerabilidades, con base en varios criterios, incluido el riesgo potencial de interrumpir el funcionamiento de la red estratégica de carreteras. La priorización proporciona una base para establecer un programa de trabajo a futuro para desarrollar e implementar planes de acción para la adaptación.



**Figura 17. Modelo del Marco para la Adaptación de la Agencia de Carreteras**

Fuente: Elaboración propia, basada en HA, 2012.

Entre las áreas clave de atención se encuentran la gestión interna de procesos de negocio, la resiliencia de las redes, la evaluación de inversiones y varios aspectos específicos del diseño y mantenimiento de pavimentos, estructuras y drenaje de carreteras.

Las recomendaciones específicas para la aplicación incluyen la implementación temprana de las medidas de adaptación cuando éstas sean sencillas, de bajo costo y sus beneficios sean de larga duración.

#### 4.2.3.2 Marco para un Desarrollo Resiliente al Clima de la USAID

En 2010, la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID por sus siglas en inglés) comenzó a programar recursos sustanciales específicamente dedicados a la adaptación al cambio climático.

Basado en las lecciones aprendidas de las políticas de adaptación y con el objetivo de contar con fondos específicos para la adaptación, la USAID revisó sus directrices de adaptación a través de programas y proyectos en diversos países y,

como resultado, proponer un Marco de referencia para el desarrollo y la adaptación al cambio climático.

En lugar de tratar la adaptación como un aspecto individual del desarrollo, se crea un conjunto completamente nuevo o paralelo de procesos, este Marco incorpora la consideración de los factores estresores del clima en los procesos existentes (un proceso típicamente conocido como *mainstreaming*), el cual permite integrar las consideraciones climáticas en la planificación del desarrollo, y en ciertas etapas que integran el ciclo del proyecto o en el proceso de planificación (ver figura 18).



**Figura 18. Marco para un Desarrollo Resiliente al Clima**

Fuente: Elaboración propia, basado en USAID, 2010.

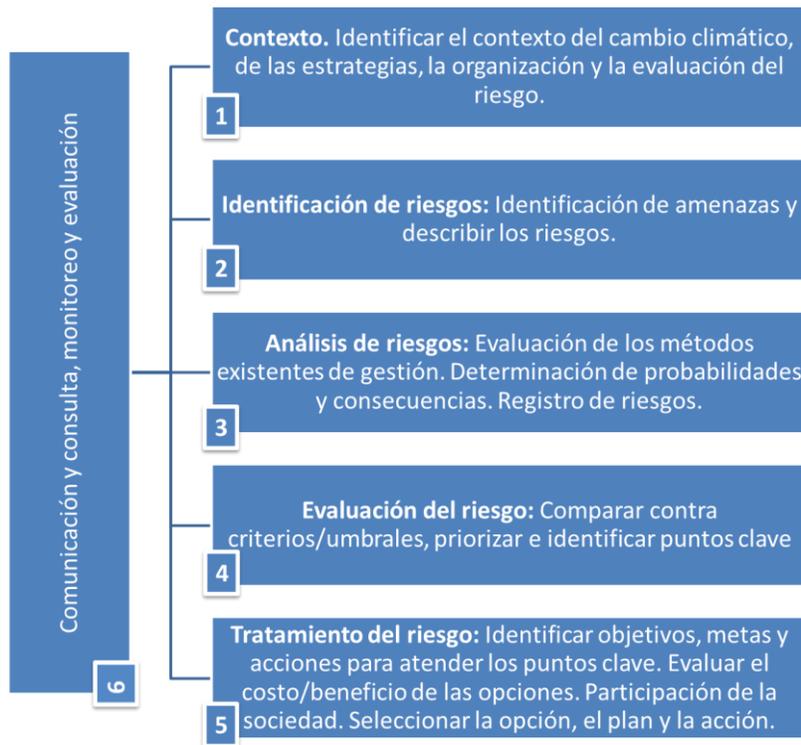
El Marco es lo suficientemente flexible para ser utilizado en una amplia gama de escalas geográficas, niveles jurisdiccionales o sectores de desarrollo, como el transporte.

Los profesionales pueden utilizar este marco para abordar los factores de estrés climático que puedan afectar los objetivos de desarrollo, para que estén en posibilidades de garantizar la implementación de las actividades de adaptación.

### 4.2.3.3 Gestión de Riesgos

El Gobierno de Nueva Zelanda (NZG, 2008), sugiere que para garantizar que el cambio climático se incluya debidamente en los procesos de planificación y toma de decisiones de las autoridades locales, es fundamental un procedimiento sólido de evaluación del riesgo. El propósito de la evaluación de riesgos, en el contexto del cambio climático, es identificar los riesgos y peligros que pueden ser inducidos o exacerbados por el cambio climático y evaluar sus efectos y su probabilidad. Este procedimiento también permite priorizar los riesgos del cambio climático y las respuestas adaptativas, posteriormente, de forma confiable y compararse equitativamente con otros riesgos, disponibilidad de recursos y costos (incluyendo obras) a los que se enfrenta la autoridad.

El proceso de evaluación de riesgos descrito en las siguientes secciones se basa en la normativa AS / NZS4360 de Nueva Zelanda para la Gestión de Riesgos. La figura 19 muestra un esquema del proceso de evaluación de riesgos.



**Figura 19. Proceso de evaluación del riesgo**

Fuente: Elaboración propia, basado en NZG, 2008.

Los procedimientos de evaluación de riesgos proporcionan un método para evaluar las implicaciones de los elementos del cambio climático, en términos de riesgos para la sociedad y sus activos, tales como las carreteras. Los riesgos pueden entonces ser priorizados y las opciones de respuesta evaluadas en términos de costos y beneficios para ayudar a la toma de decisiones de la autoridad.

Es esencial reconocer que los efectos del cambio climático van a ocurrir, con el tiempo, y que los riesgos que son ligeros ahora, en el futuro aumentarán. Por lo tanto, las respuestas pueden y deben ser planificadas de antemano. Los elementos del cambio climático deben ser incorporados en la planificación de las carreteras por las autoridades, dependiendo de la evaluación del riesgo y las prioridades.

#### **4.2.3.4 Marco Internacional para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático**

El Marco de la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC, 2015) ha sido desarrollado a través de una extensa investigación y consulta con las autoridades de carreteras a nivel mundial. El documento sintetiza la evidencia de las mejores prácticas y el conocimiento disponible a nivel internacional, incluyendo aportaciones directas de una serie de autoridades de carreteras.

El Marco es una herramienta eficaz y útil para su uso por cualquier autoridad de carreteras, independientemente de la condición geográfica, social, económica, ambiental o climática. Debido a la barreras existentes para adaptarse al cambio climático, este marco está diseñado para asegurar que cualquier autoridad de carreteras (incluso los que tienen recursos y conocimientos muy limitados) puedan empezar a tomar medidas eficaces para aumentar la capacidad de resiliencia de sus carreteras ante el cambio climático.

En su estructura, el Marco facilita la identificación y la utilización de las lecciones aprendidas de otros países, tiene en cuenta los diferentes niveles de preparación y la capacidad de adaptación y conocimiento de país a país, o de región a región. También está diseñado para ser aplicable a cualquier escala (tales como: nacional, regional, local o a un activo específico).

Este marco guía a las autoridades de carreteras a través del proceso para incrementar la capacidad de resiliencia de sus redes y activos para el transporte, 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 hallazgos en el proceso de toma de decisiones.

El siguiente diagrama muestra el detalle de las 4 etapas a través de esquemas para cada una de ellas, con la cual se ilustra de manera general este Marco (Figura 20).

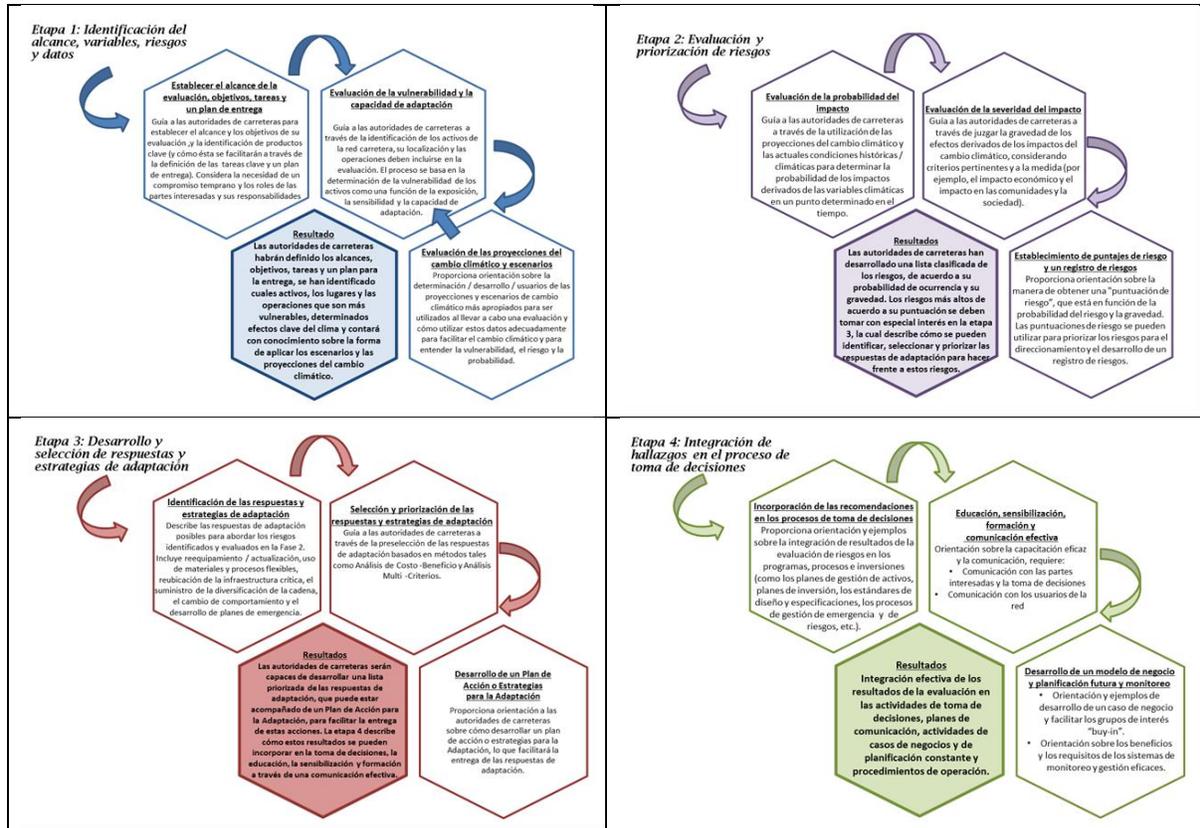


Figura 20. Marco Internacional para la Adaptación

Fuente: PIARC, 2015.

Este marco proporciona una guía y un caso global de acción para tratar de entender y abordar los impactos del cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos en la infraestructura vial.

En la Etapa 1, se da orientación para la identificación del alcance, las variables y los datos. Una vez completada esta etapa, las autoridades viales tendrán la información necesaria para elaborar una lista de los activos de la red, las ubicaciones y las operaciones para su posterior evaluación (basado en la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación) y tendrá conocimiento de cómo utilizar las proyecciones del cambio climático, conforme a los datos y pruebas existentes, para determinar las condiciones futuras o para desarrollar escenarios y proyecciones del cambio climático donde esta información no existe.

En la Etapa 2, los riesgos que presentarán los activos, las ubicaciones y la operación, identificados en la Etapa 1 de la evaluación, son evaluados y priorizados a través de la definición de su probabilidad de impacto y gravedad. A partir de esta evaluación, la calificación del riesgo se puede obtener y desarrollar un registro de riesgos priorizado. Los riesgos más altos y más significativos son llevados adelante a la etapa 3.

La Etapa 3 describe cómo las respuestas de adaptación pueden hacer frente a estos riesgos planteados en las etapas 1 y 2, y cómo pueden ser identificados, seleccionados y priorizados.

La Etapa 4 describe cómo las respuestas de adaptación priorizadas y otros resultados de la evaluación se pueden incorporar en el proceso de toma de decisiones, la forma de mejorar la educación, la sensibilización y la formación, y cómo los resultados de la evaluación se pueden comunicar con eficacia y, finalmente, poder conformar los requisitos para formar un modelo de negocio. La importancia de la evaluación continua y el monitoreo también se pone de relieve.

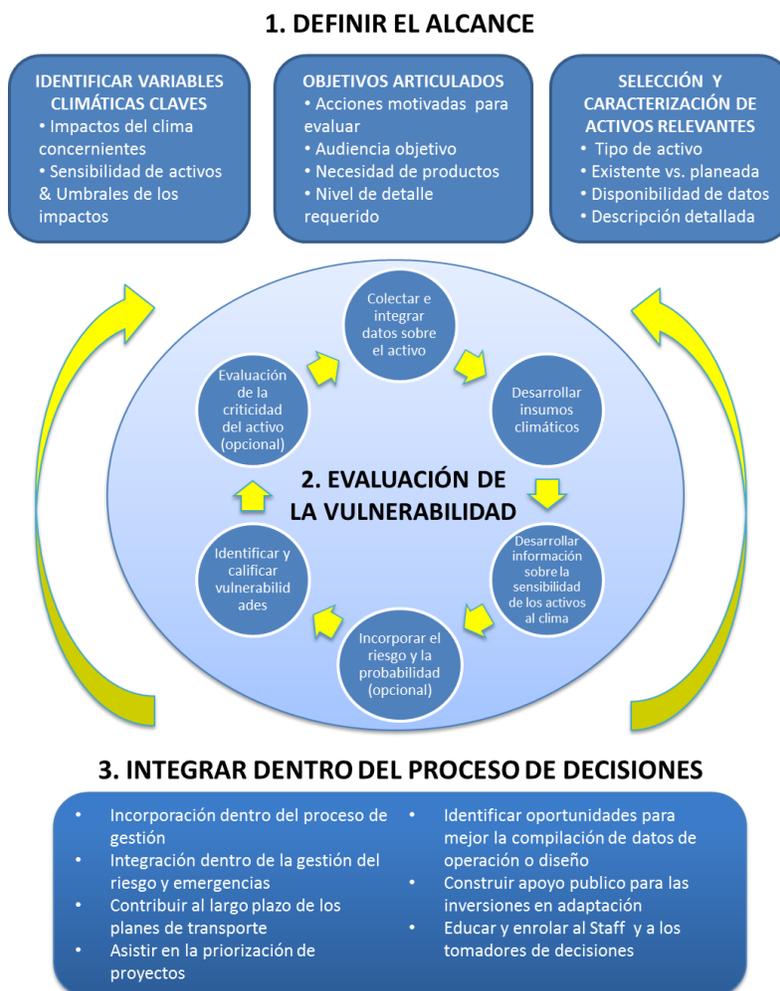
#### **4.2.3.5 Marco de Evaluación de la Vulnerabilidad del Cambio Climático y del Clima Extremo**

El Marco de Evaluación de la Vulnerabilidad del Cambio Climático y del Clima Extremo de la Administración Federal de Carreteras, 2012 (FHWA, por sus siglas en inglés), es una guía para las agencias de transporte interesadas en evaluar su vulnerabilidad al cambio climático y eventos climáticos extremos. Proporciona una visión general de pasos necesarios para la realización de evaluaciones de vulnerabilidad y utiliza ejemplos prácticos para demostrar una variedad de formas de recopilar y procesar información.

El marco consta de tres pasos clave: definir los objetivos y el alcance del estudio; evaluar la vulnerabilidad e incorporar los resultados en la toma de decisiones.

El cambio climático y la vulnerabilidad extrema, en el contexto del transporte, son una función de la sensibilidad a los efectos climáticos de un sistema o activo de transporte y la exposición a los efectos del clima y su capacidad de adaptación. El trabajo de evaluación de la vulnerabilidad es un proceso iterativo.

Los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad pueden ser utilizados por el organismo de carreteras dentro de sus programas de gestión de activos, planes de mitigación de riesgos, criterios de selección de proyectos de planificación de transporte u otros programas y procesos, tales como los programas de conservación de carreteras en México, así como informar el desarrollo de estrategias de adaptación específicas para activos identificados como altamente vulnerables al cambio climático.



**Figura 21. Marco de Evaluación de la Vulnerabilidad del Cambio Climático y del Clima Extremo**

Fuente: Elaboración propia, basado en FHWA, 2012.

El sitio web "*Virtual Framework for Vulnerability Assessment*" contiene recursos para agencias de transporte estatales y locales, de acuerdo al Marco de la FHWA. El Marco Virtual descompone el proceso de evaluación de la vulnerabilidad en seis módulos. Cada módulo contiene guías en cada etapa, testimonios en video de profesionales que comparten lecciones sobre su experiencia, estudios de caso relacionados con cada etapa del Marco, así como enlaces a recursos relacionados y herramientas para ayudar al usuario a completar cada etapa.

#### **4.2.3.6 Directrices para la inversiones resilientes al clima en el sector del transporte**

El Banco Asiático de Desarrollo, 2011 (ADB, por sus siglas en inglés), ha desarrollado una serie de estrategias para enfrentar el clima en Asia y el Pacífico,

con el objetivo de apoyar en la atención de los desafíos planteados por el cambio climático y para construir una región resiliente al clima.

Un desarrollo resiliente al clima significa integrar acciones y respuestas a las necesidades físicas, sociales y económicas del cambio climático en todos los aspectos de la planificación del desarrollo y la inversión.



**Figura 22. Evaluación de las necesidad de adaptación**

Fuente: Elaboración propia, basado en ADB, 2011.

El proceso comienza con el establecimiento del alcance del proyecto y objetivos para su evaluación. Las actividades básicas relacionadas con el diseño del proyecto se incluyen en la evaluación del impacto, la evaluación de la vulnerabilidad y la evaluación de la adaptación. Finalmente, el proceso termina con la definición de estrategias para la implementación y su marco de monitoreo.

Para facilitar la implementación del enfoque metodológico, estos seis conjuntos de actividades se dividen en 20 pasos. El proceso se ilustra en la figura 22.

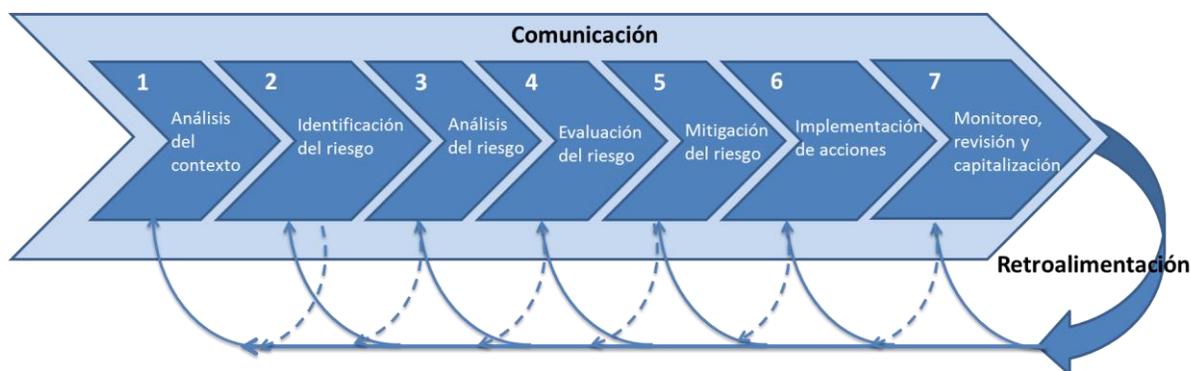
Una evaluación del cambio climático se integra mejor en las actividades de la asistencia técnica para la preparación del proyecto, tras la identificación del cambio climático como factor potencial de riesgo y/o oportunidades para el proyecto en la fase inicial (ADB, 2011).

#### **4.2.3.7 Gestión de Riesgos para Carreteras en un Clima Cambiante**

La Gestión de Riesgos para Carreteras en un Clima Cambiante (RIMAROCC, por su siglas en inglés de *Risk Management for Roads in a Changing Climate*) es una guía metodológica para la gestión de riesgos para carreteras asociados al cambio climático.

El método propuesto permite al usuario identificar los riesgos climáticos e implementar planes de acción óptimos que maximicen el retorno económico al propietario de la carretera teniendo en cuenta los costos de construcción, el mantenimiento y el medio ambiente.

El Método se basa en 7 pasos que se muestran en la figura 23.



**Figura 23. Metodo RIMAROCC**

Fuente: Elaboración propia, basado en ERA-NET ROAD, 2010.

El método busca presentar un marco y un enfoque global para la adaptación al cambio climático. Está diseñado para ser compatible y funcionar en paralelo con los métodos existentes, permitiendo que se mantengan procedimientos específicos y funcionales para la recopilación de datos, cálculos y cooperación dentro de cada organización. El método también se ajusta a la norma ISO 31000 sobre gestión de riesgos.

Cada etapa tiene una serie de pasos que se muestran a continuación.

**Tabla 4.1. Etapas de la metodología RIMAROCC**

<b>Etapas</b>	<b>Pasos</b>
1. Análisis del contexto	1.1 Establecimiento del contexto general. 1.2 Establecimiento del contexto específico para una escala particular de análisis. 1.3 Establecimiento de criterios e indicadores para el riesgo adaptados para cada escala particular de análisis
2. Identificación del riesgo	2.1 Identificar el origen del riesgo 2.2 Identificar las vulnerabilidades 2.3 Identificar posibles consecuencias
3. Análisis del riesgo	3.1 Establecimiento de la cronología y escenarios del riesgo 3.2 Determinación del impacto del riesgo 3.3 Evaluación de las consecuencias 3.4 Proveer una vista general del riesgo
4. Evaluación del riesgo	4.1 Evaluación cuantitativa de aspectos con un análisis apropiado (ACB u otras) 4.2 Comparar el riesgo climático con otro tipo de riesgos 4.3 Determinar cuales riesgos son aceptables
5. Mitigación del riesgo	5.1 Identificar opciones 5.2 Evaluar opciones 5.3 Negociar con agencias el financiamiento 5.4 Formular un plan de acción
6. Implementación de acciones	6.1 Desarrollar un plan de acción de cada nivel de responsabilidad 6.2 Implementar el plan de acción para la adaptación
7. Monitoreo, revisión y capitalización	7.1 Regular el monitoreo y la revisión 7.2 Re-planear en caso de tener nuevos datos o cuando exista demoras en la implementación 7.3 Capitalización de experiencia, sobre los eventos climáticos y el progreso de la implementación
Comunicación y recolección de información	

Fuente: Elaboración propia, basado en ERA-NET ROAD, 2010.

#### 4.2.4 Metodologías basadas en criterio experto

Mills y Andrey (2002), realizaron un trabajo para mostrar las interacciones potenciales entre el cambio climático y el transporte, basada en trabajos publicados. Los resultados muestran que el clima y el estado del tiempo (precipitación, temperatura, etc.) contribuyen como amenazas y sensibilidades dentro del sector transporte (deslizamientos de tierra, visibilidad reducida, etc.) las cuales afectan directamente la planificación, el diseño, la construcción y el mantenimiento de la infraestructura de transporte de varias maneras; también afectan indirectamente la demanda de servicios de transporte. Los costos y beneficios, medidos en términos de seguridad, movilidad, eficiencia económica y externalidades, se acumulan ya que la operación de las instalaciones y servicios de transporte cumplirían con estas demandas y se ajustarían a los riesgos

climáticos y del estado del tiempo. La figura 24 muestra los aspectos del cambio climático que pueden hacer sensible los sistemas de transporte.



**Figura 24. Diagrama de conceptualización clima versus transporte**

Fuente: Elaboración propia, basado en Mills y Andrey, 2002.

Este enfoque utilizado por Mills y Andrey, proporciona una vista general de la vulnerabilidad del sector transporte al cambio climático, bajo el supuesto de las sensibilidades actuales (documentadas por el IPCC) y que pueden ser extrapoladas al futuro.

Este tipo de metodologías es muy útil, ya que cada etapa de las metodologías descritas anteriormente, requieren análisis específicos con procedimientos ad-hoc. Por ejemplo, para la selección y priorización de medidas de adaptación, se puede hacer uso de herramientas tales como el Análisis Costo-Beneficio o Análisis Multicriterio. Otro ejemplo es la identificación de los efectos del cambio climático, que, a través de redes causa-efecto, se pueden determinar las consecuencias de los fenómenos del cambio climático.

## **5 El estado del arte sobre las mejores prácticas de adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera**

---

Una de las mayores complicaciones para adaptarse al cambio climático es la incertidumbre de los escenarios climáticos, dificultando identificar los impactos futuros del clima a nivel local o regional. Existen casos particulares donde se ha podido ser más asertivos en los pronósticos, sin embargo, aún la cuantificación económica de los efectos es complicada de evaluar.

Estas incertidumbres complican la estandarización de las medidas de adaptación, por lo que cada acción adaptativa deberá tener cierto grado de flexibilidad para continuar adaptándose a condiciones futuras del clima no previstas inicialmente. Dicho en otros términos, esto significa que tanto la infraestructura construida como la nueva deberán ser diseñadas de tal manera que permitan futuras modificaciones si así se necesitan.

La adaptación incluye cambios en las políticas y prácticas para hacer frente a las amenazas y riesgos del cambio climático. En el contexto del transporte tiene dos objetivos principales, proteger a las personas y asegurar la integridad física de su infraestructura.

Este capítulo resume la práctica internacional de las acciones de adaptación en el sector carretero, clasificadas por etapa del proyecto, las cuales en el futuro podrán ser sub-clasificadas por evento climático o tipo de impacto.

### **5.1 Planeación del proyecto carretero**

Uno de los pasos más críticos en la adaptación de la infraestructura es la integración de las consideraciones de adaptación al cambio climático en las normas y la toma de decisiones; sin embargo, es la acción con mayor impacto para el desarrollo de nueva infraestructura resiliente al cambio climático. Los siguientes párrafos describen acciones enmarcadas por diferentes autores.

- a) En Nueva Zelanda se cuenta con una guía para amenazas costeras, la cual sugiere, para los proyectos carreteros nuevos, que las líneas principales se ubiquen fuera de zonas de riesgo y que las carreteras secundarias se construyan perpendiculares a la línea de costa (NZCCO, 2004).

- b) Una de las principales respuestas de adaptación para la infraestructura en el Reino Unido pretende revisar las especificaciones para diseño y construcción de nueva infraestructura, incluyendo el factor de cambio climático y la implementación de estos nuevos estándares (DETR, 2000). Las normas y procedimientos deben considerar los efectos probables del clima, tanto para infraestructura nueva como la existente, para que sea más resiliente al estado del tiempo y el clima actual (GOC, 2004). Actualización de los requisitos de diseño, incluidas las normas y especificaciones técnicas, para proporcionar capacidad/funcionalidad adicional en el caso del cambio climático, para que el activo o la actividad tengan un desempeño satisfactorio a lo largo de su ciclo de vida [HA, 2012].
- c) Integrar herramientas para introducir la adaptación al cambio climático de la nueva infraestructura en la planeación, tales como la evaluación estratégica ambiental o la evaluación del impacto ambiental, que actualmente se utiliza para evaluar proyectos o programas (DETR, 2000).
- d) Los proyectos en su fase de planeación deberán contar con una evaluación sistemática del riesgo, basados en registros y sistemas de información precisos, mediante los cuales se pueda evaluar el riesgo del cambio climático. Será esencial un análisis de riesgo complejo, más que un análisis de partes aisladas de la infraestructura o un análisis de riesgos individuales (RAI, 2011). Actualmente, el riesgo de sobreinversión en la resiliencia innecesaria se considera mayor que el riesgo de falla de la infraestructura. De esta manera, algunas interrupciones en el transporte pueden ser inevitables. Se necesitará un perfil de riesgo para evaluar un nivel aceptable de interrupción y puede ser necesario aceptar aumentos en los tiempos de viaje para aumentar la confiabilidad.
- e) Revisar las especies de vegetación para asegurar que las que se implementen sean las más apropiadas de acuerdo al cambio climático y los fenómenos climáticos de la zona (3CAP, 2009).
- f) Las estrategias de adaptación deben incluir gestión del uso del suelo para reducir el riesgo, así como utilizarse para aprovechar el potencial de los sistemas naturales ante amenazas climáticas (NTPP, 2009).
- g) Desarrollar redundancia en los servicios, mediante estrategias que se preparan para la pérdida intermitente de servicio, por lo que será necesario el desarrollo de rutas o servicios alternativos para mantener la continuidad de los viajes cuando éste sea interrumpido por las consecuencias de un fenómeno climático (NTPP, 2009).

## 5.2 Proyecto geométrico

La reevaluación y modificación de los criterios técnicos y de planificación influirá potencialmente en el alcance y la ubicación de futuros proyectos, impactando en su proyecto geométrico, para que éste sea más adecuado al clima. Este apartado compila algunas acciones para la adaptación relacionadas con el proyecto geométrico de las carreteras.

- a) Para carreteras costeras es necesario aumentar el nivel de la subrasante para evitar inundaciones, cierres por marejadas y por el futuro creciente nivel del mar (Richardson, 2010). Las medidas pueden incluir relocalización o rediseño de la infraestructura, tanto carreteras como sus puentes, o reingeniería de la estructuras de protección (GOC, 2004). En la medida de lo posible mover las instalaciones tierra adentro de la línea de costa (IDB, 2015)
- b) Construir carreteras elevadas con zanjas de drenaje llenas de rocas a lo largo de sus costados para aumentar la infiltración (IDB, 2015).
- c) Utilizar puentes de armaduras en muelles y alcantarillas para aumentar el gasto y área hidráulica (IDB, 2015).

## 5.3 Construcción

La construcción ya no podrá llevarse a cabo en condiciones habituales “*bussines as usual*”, sino que las condiciones imperantes del clima obligarán a tomar en consideración algunas de las acciones de adaptación siguientes:

- a) Considerar la posibilidad de modificar la temporada de construcción para comenzar anticipadamente a lo habitual y finalizar antes del aumento de las temperaturas. Durante el verano, el trabajo de la construcción deberá considerar moverse a turnos de horas tempranas de la mañana y por la noche (FHWA, 2015).
- b) Revisar las especificaciones actuales de los materiales para evaluar su idoneidad para su resiliencia a los efectos del cambio climático (3CAP, 2009).
- c) Considerar la posibilidad de cambiar las especificaciones de los rendimientos de trabajo para que incluyan los efectos adversos del cambio climático (3CAP, 2009).

## 5.4 Pavimentos

En el proceso de adaptación de infraestructura se requieren ajustes en las técnicas de construcción y materiales empleados para reflejar mejor las demandas de las variables climáticas extremas, particularmente a los pavimentos, por ello se han recopilado varias experiencias que se describen a continuación:

- a) Los pavimento asfálticos porosos permiten una alta permeabilidad de los flujos de agua, por eso aproximadamente el 90% de la carreteras en Holanda están construidos con este tipo de pavimento, aunque reconocen que a pesar de este beneficio para controlar inundaciones por el cambio climático, este tipo de pavimento tiene una vida útil limitada (Kwiatkowski *et al.*, 2013). La implementación de pavimentos permeables en caminos peatonales (CCAP, 2010) reduce la acumulación del agua, que adicionalmente en carreteras de altos volúmenes podría implementarse en los acotamientos u otras instalaciones para el transporte tales como los estacionamientos.
- b) Para los pavimentos asfálticos se deben seleccionar cementos asfálticos o emulsiones asfálticas que consideren las variaciones de temperatura para evitar craqueo térmico con temperaturas frías o deformaciones bajo temperatura calientes, las innovaciones relacionadas con el diseño y la construcción pueden reducir la vulnerabilidad actual y futura de la red de carreteras (GOC, 2004).
- c) Construir pavimentos de concreto para evitar problemas con el asfalto en caso de temperaturas extremas (IDB, 2015).
- d) En la repavimentación considerar el uso de mezclas asfálticas en frío para reducir las temperaturas superficiales (FHWA, 2015).
- e) Asegurar que los planes de gestión de activos de infraestructura tomen en cuenta las adaptaciones requeridas para el cambio climático en los programas de repavimentación (3CAP, 2009).

## 5.5 Mantenimiento

El mantenimiento de la infraestructura debe ser modificado para incorporar nuevos procedimientos que incluya los impactos de los fenómenos climáticos, incrementando la periodicidad para el mantenimiento y la conservación de caminos y asignando prioridad a la reparaciones debido a lluvias intensa o inundaciones (Langis, 2013; Infraestructure Canada, 2006). Algunas de las acciones de adaptación son:

- a) El mantenimiento debe incluir limpieza de las obras de drenaje (cunetas, contracunetas, alcantarillas, etc.), levantamiento de material caído de los

taludes, retiro de sedimentos y basura, retiro de materia vegetal. etc.(  
Infraestructure Canada, 2006).

- b) Construir o mejorar diques en los principales ríos, para evitar inundaciones de la redes carreteras interurbanas, próximas a ciudades (IDB, 2015).
- c) Construir infraestructura de protección en ríos para disminuir la velocidad de los flujos de agua en las proximidades de las pilas y estribos de los puentes, para evitar la socavación.
- d) Aumentar la inspección y seguimiento de las condiciones de la carretera para programar el mantenimiento adecuado (FHWA, 2015).
- e) Aumentar el número y la frecuencia de los trabajos de mantenimiento para los puentes que se hayan identificado en riesgo susceptible por el cambio climático, para que se realicen los trabajo de refuerzo y reparación necesarios (3CAP, 2009).
- f) Invertir en la gestión de activos, llevar a cabo estudios de drenaje y mejorar la información de los activos de drenaje, capacidad hidráulica y características técnicas (3CAP, 2009).
- g) Mejorar el conocimiento sobre los árboles existentes dentro del derecho de vía y zonas aledañas, evaluar riesgos probables para establecer un esquema de prioridad para su inspección y mantenimiento (3CAP, 2009).

## 5.6 Conservación de carreteras

La conservación de carreteras sufrirá cambios que permitirán contar con infraestructura resiliente adaptada al cambio climático. Algunos especialistas sugieren las siguientes acciones de adaptación:

- a) Para asegurar un mejor funcionamiento de las obras de drenaje, tales como cunetas, contracunetas, alcantarillas, etc., es necesario revisar la ingeniería y modificar la capacidad de sus gastos hidráulicos, con la finalidad de adaptarlas a las nuevas condiciones de intensidad y duración de las lluvias (Infraestructure Canada, 2006).
- b) En zonas previstas de inundación se deben instalar sistemas de bombeo, particularmente en pasos a desnivel inferiores (IDB, 2015).
- c) Rehabilitar, renovar y mantener la infraestructura existente para cumplir con las especificaciones nuevas / revisadas (DETR, 2000). El análisis de riesgo realizado en el Reino Unido sugiere que el rediseño de la infraestructura y el fortalecimiento de activos serán más rentables si se incorporan los riesgos del cambio climático.

- d) Mejorar los sistemas de infiltración en carreteras, mediante el uso de pavimentos porosos, estanques de bioretención o pozos de alivio, etc. (IDB, 2015).
- e) Incorporar el cambio climático en el análisis del ciclo de vida de los activos carreteros y sus elementos, tales como los pavimentos (RAI, 2011). Las medidas de adaptación deben incorporarse a los procesos de mantenimiento de rutina y al reemplazo del ciclo de vida de los activos.
- f) Plantar una vegetación más tolerante a la sequía que sea menos propensa a proporcionar combustible para incendios forestales (FHWA, 2015).
- g) Identificar la naturaleza y frecuencia de los cambios que se necesitan para los regímenes de inspección y mantenimiento de puentes y otras estructuras (3CAP, 2009).
- h) Identificar las rutas que tienen el mayor riesgo de formación de hielo para implementar acciones que disminuyan el riesgo de estabilidad de los vehículos.

## **5.7 Modernización de las carreteras**

Debido a que la vida útil de la mayoría de las infraestructuras de transporte es larga, será de gran importancia identificar y poner en práctica acciones de adaptación de los componentes de la red existentes a condiciones climáticas más extremas.

- a) La modernización también puede requerir la construcción de elementos protectores contra las inundaciones y puede extenderse a la reorganización de las prácticas y enfoques operativos actuales (Cochran, 2009). Parte de este proceso requerirá la identificación y priorización de "nodos" críticos de la red para atención inmediata y refuerzo. En muchos casos, asegurar la robustez de estos nodos puede requerir la construcción de sistemas redundantes para su uso en el caso de fallas puntuales.
- b) Incorporar sistemas de alerta en los activos que se ubiquen en zonas vulnerables (FHWA, 2015).

## **5.8 Operación de las carreteras**

Para asegurar una operación adecuada y segura en las carreteras bajo las condiciones imperantes de los fenómenos climáticos actuales, se requiere implementar o considerar diferentes acciones de adaptación, tales como:

- a) En la operación se requiere información detallada en tiempo real de las condiciones climáticas y del estado físico de la infraestructura, por lo que será necesario contar con más Sistemas Inteligentes para el Transporte (ITS, por sus siglas en inglés), los cuales podrán proporcionar información a los usuarios de la red carreteras (GOC, 2004).
- b) Una adecuada gestión del agua pluvial, sobre todo en carreteras urbanas, ayuda a eliminar las inundaciones, por lo que es necesario modificar y conectar los sistemas de drenaje pluvial de los sistemas de transporte (CCAP, 2010).
- c) En zonas identificadas como potencialmente peligrosas por la inestabilidad de laderas, es importante implementar medidas de vigilancia permanente, utilizando: probetas para conocer la cantidad de lluvia, sensores para detectar movimientos, medición periódica de las deformaciones y agrietamientos, verificar la inclinación de árboles o postes (CENAPRED, 2007).
- d) Mejorar los códigos de construcción para manejar las ráfagas de viento más altas y con ellos evitar la pérdida de señalamiento vertical (IDB, 2015).
- e) El desarrollo de programas para la gestión de desastres resulta necesario para los corredores de transporte principales, para preparar las respuesta para la atención de emergencias, incluyendo escenarios de crisis que permitirán evaluar la capacidad de robustez de la infraestructura (Cochran, 2009).
- f) En cuanto a la energía, los eventos climáticos pueden comprometer su continuidad y no proveer el servicio adecuado en las instalaciones, por lo que se deberán tomar medidas para garantizar el suministros a pesar de tormentas intensas y ciclones, así como brindar las líneas de conducción adicionalmente para las altas temperaturas (RAI, 2011).
- g) Serán necesarios durante la operación sistemas automáticos para reportar las condiciones de la infraestructura de acuerdo al clima actual y el estado del tiempo, mediante la utilización de tecnología de sensores (RAI, 2011). Este tipo de tecnología se le ha denominado “Sistemas de Información Meteorológica/Climática para los Usuarios de las Carreteras”.
- h) Identificar las rutas que tienen el mayor riesgo de formación de hielo para implementar acciones que disminuyan el riesgo de estabilidad de los vehículos (3CAP, 2009). Incluye una revisión de los recursos disponibles para atender las acciones de mitigación para la operación segura de la carretera.

- i) Desarrollar rutas para la evacuación dentro del sistema carretero para salvaguardar la vida y evitar demoras en la respuesta para hacer frente a las emergencias.

## **5.9 Concientización**

El conocimiento del cambio climático y las implicaciones necesarias, que los actores involucrados requieren para hacer frente, son vitales para fortalecer toda acción de adaptación, destacando las siguientes recomendaciones:

- a) Aumentar la conciencia sobre la necesidad de la adaptación con la sociedad, los tomadores de decisiones y los ingenieros de caminos (DETR, 2000). Ayudar a los ciudadanos, las comunidades y las industrias a comprender los riesgos de los impactos del cambio climático y su papel en los esfuerzos de adaptación (NTPP, 2009).
- b) Capacitar al personal existente sobre los impactos potenciales del cambio climático y cómo esto puede afectar sus roles y responsabilidades (FHWA, 2015).
- c) Se requieren cambios en los procesos de toma de decisiones para incorporar evaluaciones del riesgo de cambio climático para hacer infraestructura más resiliente y con mayor rentabilidad (NTPP, 2009).

## **5.10 Investigación**

Es necesario realizar más investigaciones para comprender mejor cómo se establecen y aplican actualmente los criterios del cambio climático y cómo sus resultados puede auxiliar a la toma de decisiones para la adaptación, por lo que en este apartado se describen las experiencias recabadas sobre el alcance de la investigación sobre cambio climático e infraestructura carretera. A continuación se sugieren algunas oportunidades de investigación identificadas en la búsqueda bibliográfica:

- a) Un objetivo básico es realizar investigación para reducir la incertidumbre, cuando ésta presenta una barrera para determinar las opciones de adaptación óptimas con un nivel razonable de confianza. Podría también enfocarse para proporcionar una mejor comprensión de la probabilidad y las consecuencias del riesgo para la red. Alternativamente, podría ayudar a determinar o refinar las opciones de adaptación apropiadas (HA, 2012).
- b) Una de las acciones de mitigación es el uso de vehículos eléctricos o híbridos, pero poco se ha evaluado el impacto que éstos tendrán en su operación (sobrecalentamiento de las baterías, temperatura de las

estaciones de recarga, etc.) por lo que se requiere investigación sobre cómo se verán afectadas estas tecnologías e infraestructuras con los efectos del cambio climático (RAI, 2011).

- c) Existe la necesidad de generar un compendio del conocimiento sobre la recuperación de desastres relacionados con el cambio climático (RAI, 2011). Crear informes de eventos posteriores que evalúen lo que funcionó y lo que no. Revisar los planes basados en las lecciones aprendidas (FHWA, 2015).
- d) Se requiere investigar las limitaciones asociadas a los propietarios de los terrenos aledaños a la infraestructura carretera, ya que influyen negativamente en la vulnerabilidad del activo y, en ocasiones, son obstáculo para la implementación de las acciones de adaptación (RAI, 2011).
- e) Investigar otras tecnologías que sean adecuadas para una construcción más rápida durante condiciones climáticas adversas (FHWA, 2015).
- f) Trabajar con meteorólogos y climatólogos para desarrollar un proceso que incluya los eventos futuros previstos del clima (FHWA, 2015).
- g) Realizar estudios de inundación con ayuda de otras organizaciones (3CAP, 2009).
- h) Los programas de investigación federales y de otro tipo deberían desarrollar tecnologías de monitoreo que proporcionen advertencias anticipadas de fallas inminentes debido al clima (NTPP, 2009).



## 6 Conclusiones

---

La presente investigación, como primer objetivo, buscó llenar la brecha de información existente en diferentes idiomas sobre los impactos potenciales que el cambio climático está teniendo en la infraestructura del transporte y cómo los países están implementando acciones para adaptarse a estos impactos.

El trabajo se centró en la infraestructura del transporte carretero ya que en México desempeñan el rol más importante dentro del sistema de transporte nacional, incidiendo directamente en el desarrollo social y económico. Además, las carreteras representan uno de los activos más importantes del país, por lo que deben protegerse aumentando su resiliencia a través de diferentes estrategias de adaptación.

Las conclusiones y recomendaciones de este documento se basan en una revisión de la literatura de investigación y la experiencia directa de los autores en impactos climáticos y trabajo de adaptación.

La adaptación es un proceso iterativo que deberá ser ajustado, actualizado o renovado las veces que se consideren necesarias, en la medida que se genere más conocimiento, se desarrolle más tecnología y se disminuya la incertidumbre del clima.

La adaptación se ha caracterizado por la toma de decisiones bajo incertidumbres, asociadas con la ciencia del clima y sus tendencias por lo que su enfoque ha sido, en la mayoría de los casos, pragmático, participativo y flexible, mediante el cual se han construido escenarios para evaluar los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación.

En México las acciones de adaptación de la infraestructura son incipientes aún, debido a que se carece de un marco normativo que incentive los trabajos. Las políticas nacionales de adaptación enmarcan la necesidad de aumentar la resiliencia de la infraestructura estratégica, pero todavía no es claro cuáles son y cuáles se deben adaptar y proteger del clima cambiante. A pesar de ello, los sectores han comenzado a reaccionar ante el cambio climático, donde la Secretaría de Comunicaciones y Transportes ya cuenta con una guía para atender las emergencias en la carreteras cuando se presente un fenómeno hidrometeorológico, pero las acciones preventivas adaptativas continúan sin ser parte de la agenda.

El éxito de estos esfuerzos dependerá de la capacidad del gran número de agentes que participen en la planificación, la construcción, el mantenimiento y la explotación de las infraestructuras de transporte para desarrollar y aplicar

enfoques coherentes. Es importante identificar los actores implicados en la adaptación, así como cuál es el rol que desempeñan.

El desafío de la adaptación se complica aún más por los diversos actores a nivel local, regional, estatal y federal que participan en el transporte, planificación del desarrollo y uso del suelo.

Por otra parte, las barreras de la adaptación continúan siendo un freno para aumentar la resiliencia de las carreteras, el conocimiento y la disponibilidad de información deben ser los primeros retos a vencer. El liderazgo de la federación puede ayudar a disminuir las barreras institucionales que, con demasiada frecuencia, inhiben la planificación de la infraestructura resiliente.

Algunas conclusiones identificadas en la búsqueda internacional que permitirán aumentar el potencial de la estrategias de adaptación se comentan a continuación:

- La visión de la adaptación debe ser holística, e incluir no solo lo pertinente al sector transporte, sino que requiere la participación de otros sectores, como el de medio ambiente, ya que para asegurar la resiliencia de los elementos de la carreteras se tiene que ver más allá del área del derecho de vía.
- La incorporación de la adaptación al sector transporte debe consolidarse a nivel nacional, posteriormente a nivel regional y de manera específica para cada proyecto en el futuro.
- Las políticas, estrategias y opciones de adaptación serán más sólidas y de largo plazo, si éstas incorporan cierto grado de flexibilidad para aprovechar las novedades que se generen en ciencia y tecnología, tanto en la ingeniería, como en el conocimiento del futuro climático.
- Es necesario que el sector fortalezca sus propias capacidades generando conocimiento y experiencia en la adaptación al cambio climático. El fortalecimiento de la capacidad institucional es fundamental para facilitar el proceso de adaptación al cambio climático.
- Se requiere financiamiento adicional y previsible para apoyar los enfoques que buscan integrar plenamente la adaptación en la planificación y los procesos de desarrollo.
- La integración completa de las actividades de evaluación de la adaptación en el ciclo de desarrollo del proyecto.
- Se requiere, además, articular e integrar a las políticas de gestión del riesgo de desastres del sector, para consolidar acciones afines con la adaptación al cambio climático y generar un solo programa de acciones a implementar.
- Los tomadores de decisiones deberán entender que los costos de adaptación iniciales se convierten en inversiones en el largo plazo que aseguran su rentabilidad en los análisis costo-beneficio.

Las metodologías existente pueden ayudar a encaminar los esfuerzos de adaptación en el país, sólo requieren algunos ajustes mínimos, tal es el caso de la metodología de la Asociación Mundial de la Carretera, la cual ya se ha aplicado a

la red de carreteras del país en algunos estados. Sin embargo, se requiere afinar el conocimiento de los riesgos a los que están expuestos los activos carreteros y el método para identificarlos, precisando el efecto que cada fenómeno climático pueda tener sobre el activo o la red de carreteras, ya que el expertise en cambio climático es clave para la identificación de la vulnerabilidad o criticidad de la red actual.

Dado que la infraestructura tiene un largo ciclo de vida, su planeación debe desarrollarse más detalladamente e integrar nuevos enfoques en su planeación, tales como criterios de sustentabilidad, infraestructuras verdes, además del cambio climático.

Las medidas adaptativas identificadas en esta investigación se centran principalmente en los cambios de los procedimientos de planificación y en los criterios técnicos para ajustar mejor la nueva infraestructura a un clima cambiante, así como la adaptación y, en ciertos casos, la protección de las infraestructuras existentes.

Las políticas y estándares existentes de construcción y mantenimiento de carreteras se basan en datos climáticos históricos, por lo que debe modificarse a predicciones futuras, para que la red de carreteras sea resiliente frente a un clima cambiante y, con ello, poder minimizar las perturbaciones y los costos causados por el cambio climático en el futuro.

Las acciones de adaptación no son únicas, son ilustrativas, dado que cada región y país debe abordar su propia problemática actual del clima y con base en ello comenzar a adaptarse proponiendo sus propias medidas de adaptación

Este documento sirve como un primer paso, identificando la necesidad de más investigación sobre la adaptación al cambio climático y a la generación de más información que auxilie a la toma de decisiones, para tener una mejor planificación y construir/adaptar infraestructura que sea resiliente al los impactos del cambio climático.



## Bibliografía

---

- Adger, W. Neil; Brooks, N.; Bentham, G.; Agnew, M.; Eriksen, S. (2004). New indicator of vulnerability and adaptive capacity. Technical Report Co. 7. Tyndall Centre for Climate Change Research. University of East Anglia. United Kingdom.
- Agrawala, Shardul; Fankhauser, Samuel. (2008). Economic Aspects of Adaptation to Climate Change: Costs, Benefits and Policy Instruments. Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD). Paris, France.
- Alcocer Martínez de Castro, Sergio Manuel. (2004). Estrategia nacional para prevenir desastres por inestabilidad de laderas. Boletín UNAM-DGCS-532. Instituto de Ingeniería de la UNAM. Ciudad de México, México.
- A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.]). Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza.
- Asian Development Bank. (2011). Guidelines for climate proofing investment in the transport sector: Road infrastructure projects. Mandaluyong City, Philippines.
- Austrroads. (2004). Impact of Climate Change on Road Infrastructure. Austrroads Publication No. AP-R243/04. Sidney, Australia.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2013). Integración de la Gestión de Riesgo de Desastres y la Adaptación al Cambio Climático en la Inversión Pública. Washington, D.C.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2014). Evaluación Temática. El Cambio Climático y el BID: Creación de Resiliencia y Reducción de Emisiones. Washington, D.C. [BID, 2014]
- Bhamidipati, Srirama. (2014). Simulation framework for asset management in climate-change adaptation of transportation infrastructure. European Transport Conference 2014. Transportation Research Procedia 8 ( 2015 ), pag. 17 – 28. Netherlands.
- Cambridge Systematics, Inc. (2009) . Transportation Adaptation to Global Climate Change. Bipartisan Policy Center - National Transportation Policy Project (NTPP). Cambridge, Massachusetts, USA. [NTPP, 2009]

- Chinowsky, Paul; Arndt, Channing. (2012). Climate Change and Roads: A Dynamic Stressor–Response Model. *Review of Development Economics*, 16(3), 448–462, 2012. Blackwell Publishing Ltd.
- City of Chicago. (2010). Chicago Climate Action Plan. Chicago, USA. [CCAP, 2010]
- Cochran, Ian. (2009). Climate change vulnerabilities and adaptation possibilities for transport infrastructures in France. Climate Report No. 18. Research on the economics of climate change. Paris, France.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2003). Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los Desastres. Santiago de Chile, Chile.
- Comisión Intersecretarial el Cambio Climático. (2012). Adaptación al cambio climático en México: visión, elementos y criterios para la toma de decisiones. Ciudad de México, México.
- Conference of European Directors of Roads (CEDR). (2010). Risk management for roads in a changing climate. A Guidebook to the RIMAROCC Method. ERA-NET ROAD.
- Conference of European Directors of Roads (CEDR). (2015). Call 2012: Road owners adapting to climate change. ROADAPT: Guidelines “Roads for today, adapted for tomorrow”.
- Consultora Ambiental Sol Ambiente. (2013). Diplomado “Elaboración y evaluación de estudios de impacto ambiental”, Modulo V “Taller de metodologías para la evaluación de impactos ambientales. Universidad Nacional de Trujillo. Perú. [CASA]
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (1997). Protocolo de Kioto sobre el cambio climático. [CMNUCC, 1997]
- Department of the Environment, Transport and the Regions, of United Kingdom. (2000). Potential UK adaptation strategies for climate change. West Yorkshire, United Kingdom. [DETR, 2000]
- Department of Transportation (US DOT). (2014). Climate Adaptation Plan . Ensuring Transportation Infrastructure and System Resilience. Washington, DC, USA.
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2013). A closer look at Vulnerability Assessment. Inventory of Methods for Adaptation to Climate Change. Adaptation Community Net. Eschborn, Germany. [GIZ, 2013]

- Estrada, F.; J.Tol R. S.; Gay, C. (2011). A critique of The Economics of Climate Change in Mexico. ESRI Working Paper No. 408.
- Federal Highway Administration. (2012). Climate Change & Extreme Weather Vulnerability Assessment. Washington, DC, USA.
- Federal Highway Administration. (2015). Climate change adaptation guide for transportation systems management, operations, and maintenance. Washington, DC, USA.
- Galindo, L. M., (ed.). (2009). La economía del cambio climático en México: Síntesis. Secretaría de Hacienda y Crédito Público, y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México.
- Government of Canada. (2004). Climate Change Impacts and Adaptation Program. A Canadian Perspective. Ottawa, Canada. [GOC, 2004]
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2014). Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad - Resumen para responsables de políticas. Ginebra, Suiza.
- Highways Agency of United Kingdom. (2012). Climate Change Adaptation Strategy and Framework. London, UK. [HA, 2012]
- IDB-ECLAC-WWF. (2013). The Climate and Development Challenge for Latin America and the Caribbean: Options for Climate-Resilient, Low-Carbon Development.
- Infraestructure Canada. (2006). Adapting Infrastructure to Climate Change in Canada's Cities and Communities. A Literature Review. Canada.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2016). Diálogo Público-Privado sobre los Compromisos Nacionalmente Determinados (CND). Sector Transporte. Ciudad de México, México. [INECC, 2016]
- Inter-American Development Bank (IDB). (2014). Climate services: a tool for adaptation to climate change in Latin America and the Caribbean. Action plan and case study applications. Washington, DC, USA.
- Inter-American Development Bank (IDB). (2015). Climate Change Risk Management Options for the Transportation Sector. Fact sheets. Washington, DC, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change (2014). Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [IPCC, 2014]

- Kwiatkowski, Kyle P.; Stipanovic Oslakovic, Irina; ter Maat, H.W.; Hartmann, Andreas; Chinowsky, Paul; Dewulf, G.P.M.R. (2013). Climate Change Adaptation And Roads: Dutch Case Study Of Cost Impacts At The Organization Level. Engineering Project Organization Conference. Working Paper Proceedings. Colorado, USA.
- Langis, Joanne. (2013). Adaptation measures for floods, storm surges, and sea level rise. Université de Moncton. Nouveau Brunswick, Canada.
- Mehrotra, Shagun; Natenzon, Claudia; Omojola, Ademola; Folorunsho, Regina; Gilbride, Joseph; Rosenzweig, Cynthia. (2009). Framework for city climate risk assessment. Fifth Urban Research Symposium 2009.
- Mendelsohn, R. (2000), "Efficient Adaptation to Climate Change", *Climatic Change* 45(3-4), pp. 583-600.
- Mills, Brian; Andrey, Jean. (2002). "Climate Change and Transportation: Potential Interactions and Impacts," in *The Potential Impacts of Climate Change on Transportation: Workshop Summary*, U.S. Department of Transportation, Workshop, 1–2 October, 2002.
- Ministerio de Transporte. (2014). Plan Vías-CC: Vías compatibles con el clima. Plan de Adaptación de la Red Vial Primaria de Colombia. Bogotá, Colombia. [MTC, 2014]
- National Academy of Sciences. (2008). *New Directions in Climate Change Vulnerability, Impacts, and Adaptation Assessment: Summary of a Workshop*. ISBN: 0-309-13007-7. [NAS, 2008]
- New Zealand Climate Change Office (NZCCO) of the Ministry for the Environment (2004). *Coastal hazards and climate change: a Guidance Manual for local government in New Zealand*. New Zealand.
- New Zealand Government. (2008). *Climate change effects and impacts assessment. A Guidance Manual for Local Government in New Zealand*, 2<sup>nd</sup>. Edition. Ministry for the Environment. Wellington, New Zealand. [NZG, 2008]
- Richardson, G. R. A. (2010). *Adapting to Climate Change: An Introduction for Canadian Municipalities*. Natural Resources. Canada. Ottawa, Canada.
- Scheraga, Joel D.; Grambsch. Anne E. (1998). *Risks, opportunities, and adaptation to climate change*. U.S. Environmental Protection Agency. *Climate Research*, Vol. 10: 85–95. USA
- Schweikert, A.; Chinowsky, P.; Kwiatkowski, K.; Espinet, X. (2014). The infrastructure planning support system: Analyzing the impact of climate change on road infrastructure and development. *Transport Policy*, 35, 146-153. [IPSS, 2014]

- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2013). Guía para la atención de emergencias en carreteras y puentes. Dirección General de Conservación de Carreteras. México, DF.
- Secretaría de Gobernación. (2007). Cartilla de diagnóstico preliminar de inestabilidad de laderas. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México, DF. [CENAPRED, 2007]
- Secretaría de Gobernación. Lineamientos del Fondo para la Atención de Emergencias (FONDEN). Diario Oficial de la Federación, 3 de julio de 2012.
- Secretaría de Gobernación. Lineamientos de Operación específicos del Fondo de Desastres Naturales. Diario Oficial de la Federación, 31 de enero de 2011.
- Secretaría de Gobernación. Reglas de Operación del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales. Diario Oficial de la Federación, 23 de diciembre de 2010.
- Secretaría de Gobernación. (2014). Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales. Centro Nacional de Comunicaciones de Protección Civil. México, DF.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), Visión 10-20-40. México, DF. [ENCC, 2013]
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018. México, DF, Abril de 2014
- Stern, Nicholas. (2006). Stern Review on the Economics of Climate Change. The Office of Climate Change. UK Government.
- The 3 Counties Alliance Partnership (3CAP). (2009). The Effect of Climate Change on 3CAP's Highway Network Policies and Standards. London, United Kingdom.
- The Royal Academy of Engineering. (2011). Infrastructure, Engineering and Climate Change Adaptation – ensuring services in an uncertain future. Engineering the Future. London, United Kingdom. [RAI, 2011]
- United States Agency for International Development (USAID). (2014). Climate-Resilient Development: A framework for understanding and addressing climate change. Washington, DC, USA.
- World Road Association. (2015). International Climate Change Adaptation Framework for Road Infrastructure. Paris, France. [PIARC, 2015]

**Páginas web:**

<http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/>

<http://www.proteccioncivil.gob.mx/es/ProteccionCivil/Organizacion>

<http://smn1.conagua.gob.mx/>

## Anexo 1. Terminología

---

Para comprender y uniformizar criterios sobre el cambio climático resulta necesario conocer las definiciones que ha establecido el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

**Cambio Climático:** Es la variación del estado del clima, identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo (IPCC, 2014).

La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1997), en su artículo 1, define el cambio climático como: "un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables". La Convención Marco de este modo hace una distinción entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas de la alteración de la composición de la atmósfera, y la variabilidad climática atribuible a causas naturales.

**Peligro:** Es la ocurrencia potencial de un evento físico natural o provocado por el hombre, o un impacto físico, que puede causar la pérdida de vidas, lesiones u otros impactos negativos en la salud, así como daños y pérdidas a la propiedad, la infraestructura, los medios de vida, la prestación de servicios, los ecosistemas y los recursos ambientales. El peligro en el cambio climático se refiere a los acontecimientos o tendencias físicas que están relacionados con el clima o sus impactos físicos (IPCC, 2014).

El peligro será entonces una condición potencial de producir un daño sobre algún elemento del sistema ambiental.

**Exposición:** La presencia de las personas, los medios de vida, especies o ecosistemas, las funciones, servicios y recursos ambientales, infraestructura o activos económicos, sociales o culturales, en sitios y entornos que podrían verse afectados de manera adversa (IPCC, 2014).

Por lo tanto, la exposición es el grado en que un sistema ambiental se pone en contacto con las condiciones climáticas o los impactos climáticos específicos y la probabilidad, de que este estrés afecte a la infraestructura de transporte.

**Vulnerabilidad:** La propensión o predisposición a verse afectada negativamente. La vulnerabilidad abarca una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para hacer frente y adaptarse (IPCC, 2014).

De esta manera, la vulnerabilidad describe el grado de susceptibilidad a la que un sistema se encuentra frente a los efectos adversos del cambio climático.

**Impactos:** Efectos sobre los sistemas naturales y humanos. El término impacto se utiliza principalmente para referirse a los efectos sobre los sistemas naturales y humanos derivados de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, y del cambio climático. Los impactos se refieren, en general, a los efectos sobre la vida, los medios de vida, la salud, los ecosistemas, las economías, las sociedades, las culturas, los servicios y la infraestructura debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren dentro de un período de tiempo específico y la vulnerabilidad de una sociedad, o un sistema expuesto. Los impactos también se conocen como consecuencias y resultados. Los impactos del cambio climático en los sistemas geofísicos, que incluyen inundaciones, sequías y aumento del nivel del mar, son un subconjunto de los impactos llamados impactos físicos (IPCC, 2014).

En la actualidad existen un gran número de impactos del cambio climático identificados, los cuales pueden variar por región, por el sector de la economía a la que pueden impactar, por lo que para cada estudio de adaptación deberán precisarse.

**Riesgo:** Es el potencial de consecuencias cuando algo de valor está en peligro y donde el resultado es incierto, reconociendo la diversidad de valores. El riesgo se representa a menudo como la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos o tendencias multiplicados por los impactos, si ocurrieran estos eventos o tendencias. El riesgo resulta de la interacción de la vulnerabilidad, la exposición y el peligro. El término riesgo se utiliza principalmente para hacer referencia a los riesgos de los impactos del cambio climático (IPCC, 2014).

Por lo tanto, el riesgo caracteriza tanto la probabilidad de que ocurra el evento, como la consecuencia del mismo.

**Adaptación:** Es el proceso de adaptación al clima actual, o esperado, y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación tiene por objeto moderar o evitar el daño o de aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar la adaptación al clima esperado y sus efectos (IPCC, 2014).

La adaptación es una medida que permite reducir la vulnerabilidad de las personas, de la infraestructura y de los ecosistemas a los cambios climáticos actuales, que se presentan a través de diversos fenómenos climáticos, así como permite evitar o reducir el impacto que se pudiera presentar como consecuencia de dichos fenómenos climáticos.

**Transformación:** Es un cambio en los atributos fundamentales de los sistemas naturales y humanos. La transformación podría verse reflejada en el fortalecimiento, la modificación, o la alineación, de paradigmas, metas o valores que apuntan hacia la promoción de la adaptación para un desarrollo sustentable, incluyendo la reducción de la pobreza.

El término transformación es poco utilizado en la adaptación al cambio climático, particularmente en la infraestructura del transporte.

**Resiliencia:** La capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales para hacer frente a un evento, tendencia o perturbación peligrosa, para responder o reorganizarse de manera que mantengan su función esencial, la identidad y estructura, conservando al mismo tiempos su capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación.

Entonces, una infraestructura resiliente será aquella infraestructura del transporte que al ser sometida a condiciones de estrés por la presencia de un fenómeno del cambio climático mantiene su operación y su integridad estructural.

**Mainstreaming** se refiere a la integración de factores de estrés climático en la planificación y la toma de decisiones existentes. Significa que las instituciones y procesos existentes pueden incluir el cambio climático como una consideración adicional.

Por ejemplo, la planificación estratégica no sólo tendría en cuenta los cambios en la población, las condiciones económicas y las pautas comerciales, etc., sino también el cambio climático.



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El colorado-Galindo"  
Parque Tecnológico San Fandila  
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México  
CP 76703  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>