



Impacto del cambio climático en la infraestructura del transporte por carretera: una revisión sistemática de las medidas de adaptación

Tipología de tesis:

Trabajo de revisión

Línea de investigación:

Transportes, tránsito y movilidad

José Eduardo Vargas Morales

Proyecto presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Infraestructura Vial

Director:

Ing. Carlos Alberto González Camargo

Codirectora:

Ing. July Estefany Carmona Álvarez

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2025

Índice

	Pág.
1. MOTIVACIÓN	2
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
3. JUSTIFICACIÓN.....	5
4. OBJETIVOS.....	6
4.1 Objetivo general	6
4.2 Objetivos específicos.....	6
5. METODOLOGÍA	7
6. RESULTADOS ESPERADOS	8
7. ESTADO DEL ARTE	9
8. ESTRUCTURA MARCO TEÓRICO.....	11
9. RESULTADOS.....	27
10. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	92
REFERENCIAS.....	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales Tratados internacionales sobre cambio climático.....	28
Tabla 2. Pasos necesarios para realizar una evaluación de riesgos del cambio climático en las carreteras.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Áreas vulnerables a eventos de fuertes precipitaciones e inundaciones (Colombia).....	54
Figura 2. Participación por departamentos en pérdidas en el transporte de carga, ocasionadas por los desastres de diciembre-febrero del evento La Niña	56
Figura 3. Ubicación de Los Páramos	71
Figura 4. Lineamientos relacionados con riesgos red de carreteras.....	72
Figura 5. Esquema de los pasos necesarios para realizar una evaluación de riesgos del cambio climático en las carreteras.....	80
Figura 6. Lineamientos CAF.....	87

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis directores de proyecto, Ing. July Carmona e Ing. Carlos González, quienes, con su invaluable dedicación, tiempo y conocimiento, guiaron y enriquecieron este proyecto de investigación. Sus profundos conocimientos fueron fundamentales para alcanzar este logro.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado a mis padres que siempre me han apoyado en mi vida personal y profesional. Su bendición y apoyo han sido parte fundamental en el logro de cada uno de los objetivos que me he propuesto durante el paso de las diferentes etapas de mi vida

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo principal describir dinámicas estratégicas relacionadas a medidas de adaptación tendientes a promover la sostenibilidad e innovación en la infraestructura del transporte por carretera que permitan enfrentar los impactos de las amenazas climáticas.

De este modo, se trató de una revisión sistemática a en donde se consideraron las características principales de la infraestructura del transporte por carretera según revisión documental, se analizó el impacto del cambio climático en la infraestructura del transporte por carretera de acuerdo con los estudios incluidos en el repositorio de investigaciones y se plantearon estrategias relacionadas a medidas de adaptación que consideren los impactos de las amenazas climáticas en la infraestructura del transporte por carretera.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el costo de la inacción para la adaptación aumentará bajo un clima cambiante. Por lo tanto, este estudio presentó una lista de medidas de adaptación identificadas en la literatura (incluyendo categorías duras y blandas), que pueden considerarse en la planificación de la infraestructura del transporte por carretera y contribuir en el proceso de toma de decisiones. Finalmente, se hizo énfasis en un caso práctico relacionado con la afectación de la infraestructura vial por el clima, en la región andina. Por lo tanto, este trabajo es útil para los formuladores de políticas, autoridades y académicos de todo el mundo al evaluar la literatura existente para ampliar el conocimiento de ingenieros, académicos y autoridades sobre el tema.

Palabras Clave: Cambio Climático, Infraestructura, Transporte por Carretera, Estrategias.

ABSTRACT

The main objective of this paper was to describe strategic dynamics related to adaptation measures aimed at promoting sustainability and innovation in road transport infrastructure that allow it to address the impacts of climate threats.

Thus, it was a literature review where the main characteristics of road transport infrastructure were considered according to a documentary review, the impact of climate change on road transport infrastructure was analyzed according to the studies included in the research repository, and strategies related to adaptation measures that consider the impacts of climate threats on road transport infrastructure were proposed.

According to the results obtained, the cost of inaction for adaptation will increase under a changing climate. Therefore, this study presented a list of adaptation measures identified in the literature (including hard and soft categories), which can be considered in road transport infrastructure planning and contribute to the decision-making process. Finally, a practical case related to the impact of climate on road infrastructure in the Andean region was highlighted. Therefore, this work is useful for policy makers, authorities and academics around the world by evaluating the existing literature to expand the knowledge of engineers, academics and authorities on the subject.

Keywords: Climate Change, Infrastructure, Road Transport, Strategies.

1. MOTIVACIÓN

En relación con el fundamento; la infraestructura de transporte es vital para sostener la economía, las sociedades, la seguridad y el bienestar de la comunidad de las naciones. Sin embargo, la misma es cada vez más vulnerable a eventos climáticos extremos que amenazan la funcionalidad a largo plazo de estos sistemas al degradar la integridad y el rendimiento de la infraestructura; por lo que, como estudiante y futuros magister es necesario abordar estos problemas.

En relación con la motivación; los efectos del cambio climático ya son visibles y afectan la vida diaria, por lo cual es clave como personas comprender los determinantes de la preocupación ambiental. Así, el ambiente sostiene la economía, la sociedad y, de hecho, la existencia misma. Los bosques, ríos, océanos y suelos proporcionan los alimentos que se comen, el aire que se respira y el agua con la que se riegan los cultivos; también, el ciudadano depende de éstos para muchos otros bienes y servicios a los cuales recurre para su salud, felicidad y prosperidad. Por lo tanto, con el presente trabajo, se espera contribuir a promover la sostenibilidad e innovación en la infraestructura del transporte por carretera que permitan enfrentar los impactos de las amenazas climáticas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La construcción de sistemas e infraestructura de transporte es responsable de varios impactos positivos y negativos. Los impactos positivos están relacionados principalmente con la creación de muchos puestos de trabajo, la conexión de áreas aisladas, la mejora de la logística y el transporte de mercancía; así, todos estos son esenciales para el desarrollo humano. Por otro lado, son responsables de impactos negativos como un consumo exacerbado de recursos naturales y un aumento de las emisiones, especialmente de gases de efecto invernadero (GEI), que pueden afectar y cambiar gravemente el paisaje natural.

En este sentido, aunque los sistemas de transporte y su infraestructura están diseñados para resistir patrones climáticos típicos, los impactos del cambio climático actual y los que surjan en el corto, mediano y largo plazo pueden influir en la infraestructura misma, la eficiencia de las operaciones de transporte y la capacidad de la infraestructura para resistir eventos extremos fuera del rango típico. Esto indica que las infraestructuras no sólo deben ser confiables cuando se someten a cargas estándar, sino también ser capaces de minimizar la magnitud y duración de las fallas en condiciones excepcionales, como una mayor intensidad y cambios en los patrones de las precipitaciones y eventos climáticos más extremos (Dong, Guo, & Zeng, 2017).

Partiendo de lo anterior, el cambio climático crea varios desafíos para el sector transporte porque este sistema es altamente vulnerable a las condiciones meteorológicas y climáticas, y produce impactos debido a la ocurrencia de eventos climáticos extremos, que influyen en la vida útil de la infraestructura y la seguridad del transporte. Esto enfatiza la necesidad de considerar el cambio climático en los proyectos de infraestructura de transporte regular, incluida toda la vida útil de estos activos. Sin embargo, las agencias de transporte a menudo tienen recursos financieros limitados para el mantenimiento de carreteras y enfrentan demandas de infraestructura sostenible; así, el riesgo climático de una infraestructura de transporte depende de una variedad de factores, incluida su naturaleza, ubicación, características de diseño y prácticas de construcción (Mallick, Radzicki, Daniel, & Jacob, 2014).

De este modo, los tomadores de decisiones (como los ingenieros en infraestructura vial) responsables de determinar cuándo y dónde se debe desarrollar y/o mejorar la infraestructura se enfrentan a un nuevo desafío con el tema emergente del cambio climático, que representa uno

de los mayores desafíos que amenaza actualmente al planeta; consecuentemente, los impactos del cambio climático en la red de transporte pueden resultar en la pérdida de activos de infraestructura y obstaculizar la recuperación y la resiliencia de todo el sector, ya que la infraestructura de transporte representa una inversión sustancial para las naciones (IPC, 2021).

Por lo tanto, se vuelve cada vez más importante desarrollar medidas de adaptación para reducir los impactos del cambio climático en la infraestructura de transporte, que debe contar con acciones bien estructuradas que tengan en cuenta la participación de todas las partes interesadas en el proceso de toma de decisiones; así, la adaptación puede definirse como el proceso de ajustar el sistema al cambio climático real o esperado y sus efectos por lo que dichos ajustes pueden ser tanto de naturaleza estructural, es decir, adaptaciones duras, como de naturaleza política, educativa y social, como también adaptaciones suaves (ONU, 2015).

De tal manera, la adaptación busca moderar o evitar daños o explotar oportunidades beneficiosas por lo que las medidas de adaptación deben vincularse a prácticas actuales y futuras de reducción de riesgos e iniciativas de gestión para aumentar la resiliencia del transporte y reducir los impactos de eventos climáticos extremos. Además, estas alternativas y soluciones de adaptación deben ser compatibles con las estrategias de mitigación (es decir, deben tener sinergia) para evitar un aumento dramático de las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) (ONU, 2015).

Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo identificar y analizar, a través de una revisión sistemática con enfoques bibliométricos, estudios sobre los impactos del cambio climático en el transporte por carretera en infraestructura con un enfoque en la identificación de medidas de adaptación –adaptaciones duras y blandas– que incluye búsquedas directas en las principales bases de datos de internet. Cabe mencionar también que, para una evaluación coherente de los estudios, se utilizarán criterios de inclusión y calificación; calidad y aplicabilidad (Tolpanen & Kang, 2020).

3. JUSTIFICACIÓN

La relevancia de este estudio radica en abordar un tema de preocupación global que necesita más investigaciones relacionadas; así, este estudio da especial énfasis a los problemas de financiación para el estudio e implementación de medidas de adaptación, comunes principalmente en los países en desarrollo. Además, cabe destacar que la investigación en curso está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, especialmente en los aportes referentes a la industria, innovación e infraestructura, construir infraestructura resiliente, promover la inclusión e industrialización sostenible y fomentar la innovación; además de promover que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros y sostenibles; así también, en cuanto a la acción climática, motivación para adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos (ONU, 2015).

Igualmente, la presente investigación resulta relevante ya que puede despertar la conciencia pública sobre el cambio climático y las actitudes hacia la adopción de opciones verdes presenta una oportunidad única para examinar hasta qué punto el público en general está dispuesto a tomar medidas para modificar comportamientos para reducir las emisiones antropogénicas de carbono.

En cuanto al impacto social, los profesionales, entes públicos y comunidad en general relacionados a la infraestructura vial pueden beneficiarse del conocimiento que se aporta en esta investigación relacionado a la incorporación de proyecciones climáticas en el diseño, construcción y mantenimiento de infraestructura para mejorar la funcionalidad y confiabilidad de los sistemas de transporte contra el impacto de eventos climáticos extremos.

Finalmente, en el campo metodológico y de acuerdo con su importancia, el estudio puede contribuir con el análisis del tema para su profundización en calidad de antecedentes, y/o apoyar en la consulta de otras investigaciones que se formulen a futuro en el ámbito de esta misma temática, de acuerdo con su importancia dentro de la temática abordada.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Estudiar dinámicas estratégicas relacionadas a medidas de adaptación tendientes a promover la sostenibilidad e innovación en la infraestructura del transporte por carretera que permitan enfrentar los impactos de las amenazas climáticas.

4.2. Objetivos específicos

Comprender las características principales de la infraestructura del transporte por carretera según revisión documental.

Analizar el impacto del cambio climático en la infraestructura del transporte por carretera de acuerdo con los estudios incluidos en el repositorio de investigaciones.

Elaborar estrategias relacionadas a medidas de adaptación que consideren los impactos de las amenazas climáticas en la infraestructura del transporte por carretera.

5. METODOLOGÍA

Se realizó una revisión sistemática que implicó una búsqueda metodológica y flexible de literatura; así, el objetivo fue revisar los artículos que informan sobre Impacto del cambio climático en la infraestructura del transporte por carretera: una revisión sistemática de las medidas de adaptación a nivel global. Así, los términos de búsqueda clave fueron acordados por el equipo de investigación e incluyeron: infraestructura transporte, medidas adaptación y cambio climático. Luego, los términos clave se desarrollaron usando términos MESH y palabras clave, complementados con la inclusión de palabras clave utilizadas en los estudios a medida que se identifiquen. Las estrategias se adaptaron a cada base de datos bibliográfica según fuera necesario.

De esta forma, las bases de datos electrónicas consultadas fueron Amed, Cinahl, Embase, Index to theses, IBSS, Scopus, PsycInfo, Sociological Abstracts, Web of Science; además, se realizaron búsquedas en la base de datos NIHR Health Technology Assessment (HTA), junto con la base de datos Cochrane, Google Scholar y el repositorio institucional de la Universidad Santo Tomás. Las búsquedas fueron realizadas seleccionando artículos potencialmente relevantes de resúmenes y títulos y dentro de un período menor a cinco (5) años preferiblemente (2018 en adelante), aunque pudo abarcar bibliografía comprendida a partir del año 2000, de acuerdo con su importancia histórica o teórica.

Del mismo modo, se tuvo en cuenta las siguientes combinaciones de palabras clave con operadores booleanos: se usaron los operadores booleanos AND, OR en la cadena de búsqueda, además como truncadores se utilizó el asterisco (*) para recuperar documentos que contuvieran los términos introducidos y las comillas (") para buscar los conceptos tal cual se han introducido. Consecuentemente, se empleó la siguiente ecuación de búsqueda = "estrategia (s)" + "medidas (s) adaptación (es)" + "nivel global" + "cambio climático" + "infraestructura (s) transporte (es)".

6. RESULTADOS ESPERADOS

Se espera como resultados que se comprendan las características de la infraestructura del transporte por carretera según revisión documental; igualmente se espera concientizar en torno al impacto del cambio climático en la infraestructura del transporte por carretera y, por último, se espera delinear estrategias relacionadas a medidas de adaptación que consideren los impactos de las amenazas climáticas en la infraestructura del transporte por carretera. Así, se espera como resultado final la descripción de las dinámicas estratégicas relacionadas a medidas de adaptación tendientes a promover la sostenibilidad e innovación en la infraestructura del transporte por carretera.

7. ESTADO DEL ARTE

En el plano nacional, (Pérez & Monsalve, 2021) desarrollaron un trabajo cuyo objetivo principal fue analizar el impacto del plan nacional de adaptación del cambio climático para las obras de infraestructura vial de cuarta generación en Colombia (caso de estudio: proyecto Honda-Puerto Salgar-Girardot); así, la metodología utilizada fue desarrollada a partir de una matriz comparativa, que tendrá como base los inventarios de Mitigación de Gases Efecto Invernadero (GEI) contemplados en la tercera comunicación. Estos inventarios están estructurados por las emisiones de cada sector económico, de los cuales se tuvieron en cuenta los subsectores relacionados al campo de la infraestructura.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluyó que la percepción de la población frente a los impactos ambientales debido a la variabilidad climática, afectan en su mayoría a la población rural en el aspecto de la salud, siendo una condición determinante en la vida cotidiana de la población. En las regiones como el Caribe, Central, Oriental y Orinoquía-Amazonía, la percepción de amenaza según la población encuestada es del 18.24% y 20.32% (Pérez & Monsalve, 2021).

Por lo tanto, se recomendó continuar con el seguimiento periódico de la implementación de los diferentes programas de manejo ambiental que se requieran y que estén presentes en el proyecto Honda - Puerto Salgar - Girardot. Consecuentemente, constituye un aporte importante para la presente investigación ya que trata directamente el cambio climático para las obras de infraestructura vial, en este caso en Colombia (Pérez & Monsalve, 2021).

En el plano internacional, (Olugbem, 2021) realizó un análisis sobre el impacto del cambio climático en la infraestructura de transporte: comparación de las diferencias de percepción entre el público de EE. UU. y los profesionales del Departamento de Transporte (DOT); así, el estudio investigó las diferencias de percepción sobre el cambio climático entre los profesionales del transporte (N = 22) y el público en general (N = 2034). Igualmente, se empleó un instrumento de encuesta en línea utilizando el software Qualtrics; el estudio concluyó que los profesionales del transporte consideran importante el cambio climático, preocupantes y perjudiciales para ellos mismos y para las generaciones futuras; además que el conocimiento sobre el cambio climático y sus consecuencias en los sistemas de transporte es limitado en promedio entre el público en general.

Igualmente, (Pugno & Sarracino, 2021) realizaron un trabajo cuyo objetivo principal fue comprender por qué muchas personas realizan espontáneamente comportamientos ambientales relacionados con el cambio climático, en lugar de requerir algún incentivo; así, mediante una revisión documental, la investigación contribuyó adjuntando conocimientos intrínsecos y motivación extrínseca para la búsqueda de objetivos centrales en la vida de las personas que enfrentan los problemas climáticos.

De tal forma, se relacionaron las motivaciones con actitudes proambientales y compromisos. Entre los resultados, se halló que la motivación intrínseca se relaciona positivamente y la motivación extrínseca se relaciona negativamente a una variedad de resultados subjetivos proambientales. Este resultado, de acuerdo con (Pugno & Sarracino, 2021), es válido para diferentes submuestras y metodologías. Del mismo modo, las personas intrínsecamente motivadas tienen una mayor probabilidad estar dispuesto a pagar precios un 20% más altos, impuestos más altos y estar dispuesto a donar parte de sus ingresos a la protección del ambiente debido al cambio climático. De manera similar, intrínsecamente, las personas motivadas por aliados tienen más probabilidades de reciclar y reducir el consumo de agua para contribuir a enfrentar los impactos de las amenazas climáticas; lo contrario, se aplica a las personas con motivación extrínseca.

De acuerdo con los resultados encontrados, se concluyó que la relación entre la motivación intrínseca y el comportamiento proambiental inherente al cambio climático está bastante explorado en la literatura. Sin embargo, aún no está claro cómo interpretar la motivación intrínseca y cómo contrastarla con la motivación extrínseca; consecuentemente, se contribuye con la literatura explorando una interpretación de motivaciones que se refiere a cómo las personas abordan las metas en la vida, en lugar de cuestiones del cambio climático.

Por lo tanto, el trabajo actual constituye un aporte interesante al presente proyecto ya que trata directamente los factores que inciden en la motivación de los ciudadanos relacionados al cambio climático, lo cual sirve de concientización de cómo los ciudadanos abordan los cambios en la infraestructura del transporte por carretera que permitan enfrentar los impactos de las amenazas climáticas.

8. ESTRUCTURA MARCO TEÓRICO

8.1. Marco Referencial

8.1.1. Infraestructura Vial.

Consiste en la instalación de activos fijos incluyendo carreteras y ferrocarriles de superficie y terminales como paradas de autobús, terminales de camiones, estaciones de ferrocarril. Las operaciones de vehículos a lo largo de estos sistemas de transporte hacen que el tiempo de viaje reduzca y genere empleo en el sector, lo que en conjunto influye en la demanda agregada de bienes y servicios que, en última instancia, conduce a un aumento del PIB y al desarrollo general (Nazarnia et al., 2020).

Al respecto, la infraestructura vial tiene un efecto sobre el riesgo de accidentes porque determina cómo los usuarios de la vía perciben su entorno. En este sentido, la vía proporciona instrucciones a los usuarios de sobre lo que deben hacer. Ahora bien, en cuanto a los factores negativos de la ingeniería vial incluyen aquellos en los que un defecto de la carretera desencadena directamente un accidente, donde algún elemento del entorno de la carretera engaña al usuario de la carretera y, por tanto, crea errores humanos. Un marco para relacionar la serie de eventos en un accidente de tráfico con las categorías de factores que contribuyen al accidente factores es la Matriz de Haddon.

Consiguientemente, según la matriz desarrollada por el Dr. William Haddon Jr. en 1970 y citada por (Nazarnia et al., 2020), hay tres tipos diferentes de factores que contribuyen a los accidentes viales: a) factores humanos b) factores vehiculares y c) factores viales/ambientales. Del mismo modo, los factores viales incluyen carreteras y elementos de diseño en carretera. De tal modo, a nivel mundial, en promedio, el tres por ciento (3%) de los accidentes viales se deben únicamente a factores de la carretera, pero el treinta y cuatro por ciento (34%) de los accidentes viales son una combinación de factores de la carretera y otros factores. Igualmente, se ha demostrado que los factores viales y ambientales han sido responsables del diecisiete por ciento (17%) del total de accidentes en autopistas a nivel mundial (Nazarnia et al., 2020).

8.1.2. Infraestructura del Transporte por Carretera.

La infraestructura de transporte es omnipresente y es fundamental para el bienestar económico y social de una sociedad moderna, ya que proporciona movilidad personal, accesibilidad a los servicios y el movimiento de bienes y facilita tanto la actividad económica como la interacción social. La infraestructura incluye puertos, puertos y aeropuertos, redes de carreteras, ferrocarriles y oleoductos, los depósitos e instalaciones asociados a estas redes y los servicios de transporte públicos y privados que operan en ellas. Los componentes físicos de la infraestructura de transporte incluyen puentes, túneles, aceras, vías férreas, alcantarillas, muelles, plataformas y tuberías. Estos elementos están ubicados en el suelo o encima o debajo del nivel del suelo, pero siempre asociados o unidos al suelo; así, pueden existir en cortes o terraplenes o en la superficie natural. Por tanto, la infraestructura de transporte se ve directamente afectada por las condiciones ambientales y climáticas locales.

En relación con la infraestructura del transporte por carretera; forma vínculos físicos entre regiones y naciones y es un facilitador clave para el intercambio de bienes, servicios y personas y el crecimiento económico de los países. La Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa ha proporcionado a los países de la ONU marcos legales y acuerdos para facilitar un desarrollo internacional coherente de las redes de transporte; así, recientemente se ha reconocido que la infraestructura del transporte por carretera tiene un impacto significativo en las emisiones generales de gases de efecto invernadero (GEI) (Hendel et al., 2020).

A los efectos de la visión de Hendel et al. (2020), la infraestructura del transporte por carretera se define como la red de carreteras y la infraestructura física asociada, como la señalización, la iluminación y el servicio de repostaje de vehículos. El consumo de energía, los impactos ambientales y los costos de una infraestructura de transporte por carretera se refieren a dos áreas distintas pero interrelacionadas, que incluyen (i) la construcción de la infraestructura física y los materiales de construcción asociados; (ii) el mantenimiento de la vía en el tiempo (Hendel et al., 2020). Ahora bien, cada una de estas áreas tiene un uso de energía, emisiones y costos asociados; este proyecto se centra principalmente en el uso de energía, las emisiones y los costos asociados a estas áreas, y en soluciones futuras para paliar los impactos negativos.

8.1.3. Cambio Climático.

Los cambios observados durante el siglo XX incluyen aumentos en la temperatura global del aire y de los océanos, el aumento del nivel global del mar, una reducción generalizada y sostenida a largo plazo de la capa de nieve y hielo, y cambios en la circulación atmosférica y oceánica, así como en los patrones climáticos regionales, que influyen en las precipitaciones estacionales. condiciones. Estos cambios, son causados por el calor adicional en el sistema climático debido a la adición de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Estos gases de efecto invernadero adicionales provienen principalmente de actividades humanas como la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), la deforestación, la agricultura y los cambios en el uso de la tierra.

Ahora bien, estas actividades aumentan la cantidad de gases de efecto invernadero que "atrapan calor" en la atmósfera. El patrón de cambios observados en el sistema climático es consistente con un incremento del efecto invernadero; por lo tanto, otras influencias climáticas como los volcanes, el sol y la variabilidad natural, no pueden explicar por sí solas el momento y el alcance de los cambios observados (Pugno & Sarracino, 2021).

Al respecto, el clima se refiere al promedio regional o global a largo plazo de los patrones de temperatura, humedad y precipitaciones a lo largo de estaciones, años o décadas. Si bien éste puede cambiar en tan solo unas pocas horas, puede cambiar también en períodos de tiempo más largos. Consecuentemente, el cambio climático es la variación significativa de las condiciones climáticas promedio que se vuelven, por ejemplo, más cálidas, más húmedas o más secas, durante varias décadas o más, así, constituye la tendencia a largo plazo la que diferencia el cambio climático de la variabilidad natural del tiempo (Pugno & Sarracino, 2021).

Igualmente, la actividad humana provoca cambios en la composición atmosférica, ya sea directamente (a través de emisiones de gases o partículas) o indirectamente (a través de la química atmosférica), por lo cual las emisiones antropogénicas han impulsado transformaciones en las concentraciones de WMGHG durante esta era. Así, el forzamiento radiativo (RF) es una medida del cambio neto en el balance energético del sistema Tierra en respuesta a alguna perturbación externa; consecuentemente, la RF positiva conduce a un calentamiento y la RF negativa a un enfriamiento, por lo que el concepto de RF es valioso para comparar la influencia

sobre la temperatura media global de la superficie de la mayoría de los agentes individuales que afectan el equilibrio de radiación de la Tierra (Pugno & Sarracino, 2021).

8.1.4. Impacto del cambio climático.

Existe una variabilidad decenal, interanual e interestacional en todo el sistema climático. La variabilidad interna puede disminuir la relevancia de las tendencias en períodos tan cortos como 10 a 15 años del cambio climático a largo plazo. Un esfuerzo crítico de proyectar el cambio climático es comprender si dicho cambio es parte de la variabilidad natural o si revela tendencias que son estadísticamente significativas a partir de la variabilidad natural. Debido a esto, las tendencias de modificación natural basadas en registros cortos son muy sensibles a las fechas de inicio y fin y, en general, no reflejan tendencias climáticas a más largo plazo.

Igualmente, se presenta incertidumbre para cualquier proyección futura. Si bien se siguen logrando avances en la comprensión de la física del clima y la respuesta del sistema climático al aumento de los gases de efecto invernadero, es probable que persistan muchas incertidumbres; así, el ritmo del calentamiento global futuro depende de las emisiones futuras, de los procesos de retroalimentación que amortiguan o refuerzan las perturbaciones del sistema climático y de influencias naturales impredecibles sobre el clima, como las erupciones volcánicas (Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, 2021).

De tal manera, los procesos inciertos que afectarán la rapidez con la que el mundo se calienta para una determinada trayectoria de emisiones están dominados por la formación de nubes, pero también incluyen la retroalimentación del vapor de agua y el hielo, los cambios en la circulación oceánica y los ciclos naturales de los gases de efecto invernadero. Aunque la información de cambios climáticos pasados corrobora en gran medida los cálculos hechos hoy en día, esto también puede tener cierto grado de incertidumbre debido a factores potencialmente importantes sobre los cuales se tienen todavía información incompleta (Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, 2021).

En definitiva, comprender el clima actual y futuro son cuestiones demasiado grandes y complejas para ser abordadas por un solo país, agencia o disciplina científica. A través de asociaciones y cooperación científica internacional, el Programa Mundial de Investigación Climática (PMIC)

apoya la coordinación de socios y grupos de modelización que participan en los Proyectos de Intercomparación de Modelos Acoplados o CMIP (IPCC, 2022). Los CMIP mejoran la comprensión de las interacciones dinámicas a múltiples escalas entre los sistemas naturales y sociales que afectan el clima. Con el tiempo, a medida que ha aumentado la participación en CMIP y se ha expandido el número y la complejidad de los modelos climáticos, la necesidad de experimentos cada vez más detallados y organizados llevó a que CMIP se convirtiera en un marco integrado dentro del cual se organizan una serie de proyectos de Intercomparación de modelos (MIP) individuales (PMIC, 2021).

Así, los MIP son conjuntos de experimentos y simulaciones diseñados para probar y comparar aspectos específicos de los modelos climáticos, por lo que cada MIP individual presenta un diseño experimental destinado a mejorar la comprensión de: importantes procesos físicos en el sistema climático; o la respuesta del sistema climático a factores externos (como el aumento de los gases de efecto invernadero) (IPCC, 2022).

8.1. 5. Medidas de Adaptación.

La adaptación se refiere a ajustes en los sistemas ecológicos, sociales o económicos en respuesta a estímulos climáticos reales o esperados y sus efectos; consecuentemente, se trata de cambios en procesos, prácticas y estructuras para moderar daños potenciales o beneficiarse de oportunidades asociadas al cambio climático (Pérez-Morales, 2019). En términos simples, los países y las comunidades necesitan desarrollar soluciones de adaptación e implementar acciones para responder a los impactos actuales y futuros del cambio climático.

Al respecto, la CMNUCC ha creado órganos constituidos y líneas de trabajo relevantes para avanzar en las respuestas de adaptación y mejorar la resiliencia social y ambiental. En la CMA 5, las Partes adoptaron el Marco de los EAU para la resiliencia climática global, lo que marca un hito importante para la adaptación en virtud del Acuerdo de París. El propósito del marco es guiar el logro de los objetivos global sobre adaptación y la revisión del progreso general para lograrlo con miras a reducir los crecientes impactos adversos, riesgos y vulnerabilidades asociados con el cambio climático, así como mejorar las acciones y el apoyo a la adaptación.

De este modo, el trabajo sobre adaptación dentro de la CMNUCC (ONU, 2004) ha sido de larga data. El Grupo de Expertos de Países Menos Adelantados (LEG) se creó en 2001 y actualmente tiene el mandato de brindar orientación técnica y acelerar el apoyo a los PMA en el proceso de formulación e implementación de planes nacionales de adaptación (PAN). Establecida en 2010, el Comité de Adaptación (AC) es la voz mundial en este tema y trabaja para impulsar una acción coherente de la CMNUCC sobre la adaptación en todo el mundo proporcionando orientación experta, mejorando la divulgación y apoyando la implementación del Acuerdo de París. Desde 2018, el Grupo de trabajo facilitador (FWG) promueve la puesta en funcionamiento de la Plataforma de Comunidades Locales y Pueblos Indígenas (LCIPP), facilitando la implementación de tres funciones relacionadas con el conocimiento, la capacidad de participación y las políticas y acciones sobre el cambio climático (IPCC, 2022).

En virtud del Acuerdo de París, el grupo de trabajo se estableció para proporcionar una visión y dirección colectivas para que la comunidad internacional participe en los esfuerzos necesarios de adaptación y creación de resiliencia. Tras la conclusión de un programa de trabajo de dos años, las partes adoptaron el marco para la resiliencia climática global, como parte del Consenso de los EAU; así, dicho marco incluye una variedad de objetivos temáticos y dimensionales para la adaptación y la resiliencia climática y proporciona una plataforma para una mayor implementación de acciones de adaptación sobre el terreno.

8.1.6. Medidas de Adaptación ante las Amenazas Climáticas.

Las acciones de adaptación pueden adoptar muchas formas, dependiendo del contexto único de una comunidad, empresa, organización, país o región. No existe una solución única, la adaptación puede abarcar desde la construcción de defensas contra inundaciones, el establecimiento de sistemas de alerta temprana para ciclones, el cambio a cultivos resistentes a las sequías y el rediseño de los sistemas de comunicación, las operaciones comerciales y las políticas gubernamentales. Muchas naciones y comunidades ya están tomando medidas para construir sociedades y economías resilientes; sin embargo, se necesitarán mayores medidas y ambición para gestionar los riesgos de forma rentable, tanto ahora como en el futuro (Diakakis et al., 2020).

De tal manera, una adaptación exitosa no sólo depende de los gobiernos sino también de la participación activa y sostenida de las partes interesadas incluidas las comunidades locales, las organizaciones nacionales, regionales, multilaterales e internacionales, los sectores público y privado, la sociedad civil y otros actores relevantes, así como de una gestión eficaz de conocimiento. Consecuentemente, la CMNUCC y su Acuerdo de París reconocen que la adaptación es un desafío global que enfrentan todos y tiene dimensiones locales, subnacionales, nacionales, regionales e internacionales (Diakakis et al., 2020).

Por lo tanto, constituye un componente crítico de la respuesta global a largo plazo al cambio climático para proteger a las personas, los medios de vida y los ecosistemas; así, las partes involucradas reconocen que las medidas de adaptación deben seguir un enfoque impulsado por los países, sensible al género, participativo y totalmente transparente, considerando los grupos, comunidades y ecosistemas vulnerables. Consecuentemente, la adaptación debe basarse y guiarse por la mejor ciencia disponible y, según corresponda, los conocimientos tradicionales, los conocimientos de los pueblos indígenas y los sistemas de conocimientos locales, con miras a integrar la adaptación en las políticas y acciones socioeconómicas y ambientales.

8.2. Marco Normativo

8.2.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

En 2015, las Naciones Unidas establecieron una serie de objetivos ambiciosos que se alcanzarán en los próximos 15 años para hacer del mundo un lugar mejor para todos: poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para todos. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, una colección de 17 objetivos globales establecidos por los países miembros de la ONU, son una hoja de ruta sobre cómo transformar nuestro planeta para que todos puedan vivir en paz, prosperidad y dignidad.

Así, (ONU, 2015) enumera los siguientes objetivos: fin de la pobreza, hambre cero, buena salud y bienestar, educación de calidad, igualdad de género, agua limpia y saneamiento, energía asequible y limpia, trabajo decente y crecimiento económico, industria, innovación e

infraestructura, reducción de las desigualdades, ciudades y comunidades sostenibles, producción y consumo responsable, acción climática, vida bajo el agua, vida en la Tierra, paz, justicia e instituciones sólidas y asociaciones. Así, se presenta a continuación un resumen de los objetivos más importantes.

En cuanto a erradicar la pobreza; el ODS 1 tiene como objetivo erradicar todas las formas de pobreza extrema, incluida la falta de alimentos, agua potable y saneamiento. Lograr este objetivo incluye encontrar soluciones a las nuevas amenazas causadas por el cambio climático y los conflictos; así, el ODS 1 se centra no solo en las personas que viven en la pobreza, sino también en los servicios de los que dependen y en las políticas sociales que promueven o previenen la pobreza (ONU, 2015).

En relación con el ODS 2; tiene ocho metas y 14 indicadores para medir el progreso. Las cinco metas de resultados son: poner fin al hambre y mejorar el acceso a los alimentos; poner fin a todas las formas de malnutrición; productividad agrícola; sistemas sostenibles de producción de alimentos y prácticas agrícolas resilientes; y diversidad genética de semillas, plantas cultivadas y animales de granja y domesticados; inversiones, investigación y tecnología. Los tres objetivos de medios de implementación incluyen: abordar las restricciones y distorsiones comerciales en los mercados agrícolas mundiales y los mercados de productos básicos alimentarios y sus derivados.

En cuanto al objetivo buena salud y bienestar; se busca reducir la mortalidad materna, poner fin a todas las muertes evitables de menores de cinco años, luchando contra las enfermedades transmisibles, reducir la mortalidad por enfermedades no transmisibles y promover la salud mental, prevenir y tratar el abuso de sustancias y reducir las lesiones y muertes en carretera.

En relación con el objetivo 4: educación de calidad; se analizan los índices de paridad para garantizar que los estudiantes desfavorecidos no queden excluidos (se recopilan datos sobre "mujer/hombre, rural/urbano, quintil de riqueza inferior/superior y otros como la situación de discapacidad, los pueblos indígenas"). También, hay un indicador sobre las instalaciones que tienen los edificios escolares (acceso a electricidad, internet, computadoras, agua potable, baños, entre otros) (ONU, 2015).

Igualmente, el ODS 5 es: lograr la igualdad de género y empoderar a todas las mujeres y niñas. Los indicadores incluyen, por ejemplo, contar con marcos legales adecuados y la representación de las mujeres en el parlamento nacional o en los órganos deliberativos locales. Las cifras sobre el matrimonio forzado y la mutilación/ablación genital femenina (MGF/C) también se incluyen en otro indicador (ONU, 2015).

Del mismo modo, objetivo 6: agua limpia y saneamiento; incluye lograr el acceso universal y equitativo al agua potable segura y asequible para todos, lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y de quienes se encuentran en situaciones vulnerables, mejorar la calidad del agua, reduciendo la contaminación, eliminando los vertidos y minimizando la liberación de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad la proporción de aguas residuales no tratadas (tratamiento de aguas residuales) y aumentando sustancialmente el reciclaje y la reutilización segura a nivel mundial. Y, por último, El ODS 7 es garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos; así, se busca entre otros indicadores el número de personas que tienen acceso a la electricidad (ONU, 2015).

8.2.2. Tratados Internacionales sobre Cambio Climático.

Las principales fuentes de derecho internacional sobre el cambio climático incluyen el Acuerdo de París, El paquete climático de Katowice, el Protocolo de Kioto y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático(CMNUCC); como se visualiza en la siguiente tabla.

Tabla 1

Principales Tratados internacionales sobre cambio climático

El Acuerdo de París (TIAS 16-1104) (2016)	Su objetivo general es mantener “el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C por encima de los niveles preindustriales” y proseguir los esfuerzos “para limitar el aumento de la temperatura a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales”. -niveles industriales”.
El paquete climático de Katowice (2018)	El paquete establece los procedimientos y mecanismos esenciales que harán operativo el Acuerdo de París. La adopción exitosa de directrices de implementación bien elaboradas promete generar una mayor confianza y fortalecer la cooperación internacional en uno de los mayores desafíos de estos tiempos: la transición hacia un mundo con bajas emisiones y resiliente al clima.
El Protocolo de Kioto (1994)	El Protocolo pone en práctica la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático comprometiendo a los países industrializados y las economías en transición a limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de acuerdo con objetivos individuales acordados.
Convención de las Naciones Unidas en el marco sobre el Cambio Climático (2004)	La CMNUCC está formada por múltiples organismos encargados de implementar la Convención, el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París. Los principales órganos de toma de decisiones son la COP (que implementa la Convención en su conjunto), la CMP (que implementa el Protocolo de Kioto) y la CMA (que implementa el acuerdo de París). Las decisiones tomadas por estos órganos proporcionan una fuente adicional de derecho internacional que se basa en los tratados originales.

Nota. Elaboración propia.

8.2.3. Plan Nacional de Colombia de Adaptación del Cambio Climático.

El PNACC hace parte de las estrategias políticas e institucionales del país. El Plan Nacional de Desarrollo “Prosperidad para todos” ha priorizado cuatro estrategias encaminadas a abordar de forma integral la problemática del cambio climático, dentro de las cuales se incluye la formulación

e implementación del PNACC. Estas iniciativas se articulan a través de la estrategia institucional planteada en el CONPES 3700, por medio del cual se establece la necesidad de crear el Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA) (Departamento Nacional de Planificación, 2021).

De tal forma, el objetivo último del PNACC es reducir el riesgo y los impactos socio-económicos y ecosistémicos asociados a la variabilidad y al cambio climático en Colombia. Para esto, el Gobierno nacional pretende brindar una serie de insumos metodológicos. Estos insumos ayudarán a sectores y territorios a: (a) generar un mayor conocimiento sobre los riesgos potenciales e impactos actuales, dentro de lo que se incluye su valoración económica; (b) aprovechar las oportunidades asociadas al cambio y a la variabilidad climática; (c) incorporar la gestión del riesgo climático en la planificación del desarrollo sectorial y territorial; y (d) identificar, priorizar, implementar, evaluar y hacer seguimiento de medidas de adaptación para disminuir la vulnerabilidad y exposición de los sistemas socio-económicos ante eventos climáticos (Departamento Nacional de Planificación, 2021).

Por lo tanto, este Plan de Adaptación será un proceso de construcción continuo. El PNACC más que un ejercicio con un principio y un final determinado en el tiempo será un proceso continuo, que se retroalimentará a medida que surja nueva información sobre la amenaza que representa el cambio climático y las lecciones aprendidas sobre cómo el país se va adaptando a este fenómeno.

Esta iniciativa, es liderada por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) con el apoyo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), más la participación activa de los sectores productivos, los territorios y la población. El éxito de esta estrategia depende de una adecuada articulación y del compromiso de los diferentes niveles de gobierno, así como del sector privado, las ONG y la sociedad civil; así, esta articulación se realiza en el marco del SISCLIMA (Departamento Nacional de Planificación, 2021).

9. RESULTADOS

Comprender las Características Principales de la Infraestructura del Transporte por Carretera según Revisión Documental

Vulnerabilidad

En la actualidad, el funcionamiento y progreso de la sociedad moderna depende en gran medida de las redes viales. Las condiciones climáticas extremas o los desastres naturales pueden alterar significativamente la red de transporte. Los peligros naturales como inundaciones, deslizamientos de tierra, terremotos y tsunamis tienen impactos significativos en la capacidad de los sistemas de transporte para proporcionar un modo de transporte seguro, eficiente y accesible. Se han realizado varios esfuerzos para evaluar la magnitud de dichos impactos en la movilidad del transporte la seguridad vial y las infraestructuras de transporte.

Según Zimmerman (2019), demostró que las inundaciones pueden cambiar notablemente la distribución espacial de la carga de tráfico en las redes de carreteras debido al desvío, reduciendo así significativamente la velocidad de viaje. Al ser el transporte una de las redes críticas, su falla puede causar tensión adicional en otras redes, especialmente durante situaciones de emergencia. En este sentido, el término "vulnerabilidad" se refiere a la medida de las consecuencias de fallas de la red durante diversas incidencias imprevistas. En otras palabras, es la susceptibilidad de las redes viarias a los incidentes lo que trae consigo una caída significativa en la capacidad de servicio del transporte por carretera.

En este sentido, pocos trabajos han abordado el concepto de vulnerabilidad de las infraestructuras del transporte por carretera. Si bien se han realizado muchos otros estudios para identificar la vulnerabilidad de las redes de transporte por carretera ante eventos específicos como terremotos, inundaciones, terremotos, flujos de escombros, deslizamientos de tierra y tsunamis; hay pocos estudios en el análisis de publicaciones científicas que se hayan realizado relacionados con la gestión de emergencias, la resiliencia y la accesibilidad.

Consecuentemente, los análisis detallados de las publicaciones científicas de vanguardia existentes que se centran específicamente en las redes de transporte en diferentes áreas de vulnerabilidad han sido realizados por autores como Santos et al. (2021) y Alejandro (2020). A pesar de mucha atención a la vulnerabilidad de la red de transporte por carretera, un análisis exhaustivo de varios artículos publicados específicamente sobre la métrica de evaluación de la vulnerabilidad sigue siendo deficiente.

Igualmente, D'Andrea and Cafiso (2005) introducen los conceptos de vulnerabilidad directa y vulnerabilidad indirecta; así, la vulnerabilidad directa es la propensión de un solo elemento a sufrir; mientras que la vulnerabilidad indirecta se refiere al impacto en la organización del territorio resultante del colapso de uno o más elementos que lo constituyen. Los autores se concentran principalmente en el riesgo sísmico mediante la evaluación de una vulnerabilidad estructural vinculada a las características estructurales y geométricas del tronco de la carretera y las estructuras circundantes. De esta breve descripción, se visualiza que el concepto de vulnerabilidad es particularmente variado y aplicable a diferentes campos. Dependiendo del punto de observación, se puede hablar de vulnerabilidad de una región, vulnerabilidad de la red, vulnerabilidades de elementos de la red (cadenas, enlaces, nodos), vulnerabilidades de un tronco particular de la red de carreteras, o vulnerabilidad de una estructura particular de la red.

Finalmente, Pugno & Sarracino (2021) comparten las metodologías para evaluar la vulnerabilidad en los sistemas de transporte por carretera en dos enfoques conceptuales diferentes: el primero se refiere a un análisis de la vulnerabilidad topológica de la red de transporte, el segundo se basa en el análisis de la vulnerabilidad sistémica de redes del transporte. La vulnerabilidad topológica se puede determinar en función de la configuración de la red y es una característica inherente independiente de los eventos críticos a los que está sujeta y del tráfico que circula.

Por tanto, la vulnerabilidad topológica depende de las características del grafo y, en particular, del grado de su conexión. La vulnerabilidad del sistema está ligada a la funcionalidad de la red y depende tanto de la configuración espacial de la red (por lo tanto, está conectada a la vulnerabilidad de la topología) como de los flujos que circulan. Sin embargo, la vulnerabilidad del sistema se refiere a los efectos que ocurren globalmente en una red vial como resultado de una interrupción independientemente del evento que la generó; así, el estudio de vulnerabilidad del

sistema permite evaluar qué cadenas son más importantes para mantener la funcionalidad general de la red vial (Pugno & Sarracino, 2021).

Amenaza y Riesgo

La complejidad de la infraestructura se expresa en su estructura de red vial, en la que cada elemento individual puede ser significativo para todo el sistema. De hecho, no es posible proteger todos los componentes del sistema, por lo que es importante identificar los elementos clave que garantizan la funcionalidad del sistema. Existen varios criterios según los cuales a los elementos individuales de la infraestructura vial se les puede asignar su importancia clave (Sventeková et al., 2020; Kubás et al., 2021).

Generalmente, se definen mediante criterios sectoriales y transversales. Sin embargo, al evaluar los riesgos es necesario considerar la importancia del elemento para la red vial en su conjunto y el papel de la comunicación específica en el contexto de toda la infraestructura vial de un país o región. Además, es necesario conocer el impacto de su falla en la fluidez y seguridad de las operaciones, así como la posibilidad de su restauración después de un posible accidente. Estos hechos, también deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar elementos clave; así, la evaluación de riesgos o funcionalidad de los elementos de la infraestructura vial descansa en evaluar el nivel de su vulnerabilidad y la capacidad de restaurar su función después de un evento adverso (Kubás et al., 2021).

Ahora bien, como parte de la evaluación de riesgos o de amenazas de elementos clave de la infraestructura de transporte, es necesario considerar cuidadosamente todos los factores del entorno del subsector particular que se está evaluando y, al mismo tiempo, resulta relevante durante todo el proceso observar los principios de creación de valor en la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre; sistematicidad, estructura y oportunidad; transparencia e integridad; basado en información precisa y disponible; dinamismo, repetición, sensibilidad a los cambios; adaptación según las necesidades, teniendo en cuenta factores humanos y culturales (Sventeková, 2020).

De tal forma, el proceso de identificación de riesgos supone un enfoque uniforme y definido con precisión para la evaluación del riesgo potencial de poner en peligro un elemento clave u objeto

de la infraestructura de transporte. Así, las amenazas y la vulnerabilidad de la infraestructura han cambiado significativamente en los últimos años y este proceso probablemente continuará, por lo que la literatura profesional sobre el tema de los riesgos es ambigua y diferentes autores presentan clasificaciones de riesgos diferentes, más o menos complejas.

Según la directiva internacional europea 2008/114/CE, el análisis de riesgos en sí se define como considerar escenarios de amenazas relevantes para evaluar vulnerabilidades y el impacto potencial de la interrupción o destrucción de infraestructura crítica. Si se quiere evaluar escenarios individuales en la activación de posibles riesgos y examinar su impacto potencial, el primer paso en el análisis de riesgos en infraestructuras de transporte críticas es determinar la forma en que el riesgo dado está activado. Básicamente, existen tres tipos básicos de disfunciones de infraestructura: efecto cascada – cuando una disfunción en una infraestructura causa un defecto en otra; efecto de escalada – intensificación de las consecuencias de un evento indeseable en la infraestructura; efecto de causa común – cuando dos o más infraestructuras fallan al mismo tiempo (Council Directive, 2008).

Indivisibilidades de la Infraestructura

Las indivisibilidades de la infraestructura vial implican características de irregularidad. Según Zimmerman (2019), la capacidad de las carreteras es altamente indivisible porque está sobreutilizada o subutilizada. Así, el autor sostiene que la infraestructura es el ejemplo más importante de indivisibilidad porque sus servicios son indirectamente productivos y sólo están disponibles después de largos períodos de gestación. El capital social general comprende industrias básicas como la energía, el transporte o las comunicaciones, que deben preceder a las inversiones directamente productivas y de rendimiento más rápido y que constituyen la infraestructura y los costos generales de la economía en su conjunto.

Por su parte, Moretti & Loprencipe (2018), señalan que sus instalaciones se caracterizan por un volumen inicial considerable y bajos costos variables. Como el tamaño mínimo de estas industrias básicas es grande, el exceso de capacidad será inevitable durante el período inicial en los países subdesarrollados.

Por ejemplo, la construcción de una nueva carretera hacia una zona rural estará asociada con bajos volúmenes de tráfico que solo aumentarán con el tiempo. Dong et al. (2017) reitera este problema de la infraestructura y sostiene que la infraestructura es “desigual” porque es costosa, lleva mucho tiempo planificarla y, una vez instalada, no se elimina fácilmente. Esta irregularidad de la infraestructura vial también debe verse desde la perspectiva de sus costos irrecuperables. Un costo hundido, es aquel en el que ya se ha incurrido y no puede modificarse mediante ninguna decisión tomada ahora o en el futuro. Así, la construcción de una carretera, a un costo de 10 millones de dólares, en una ubicación deficiente no se puede cambiar, ni ninguna decisión futura puede aliviar al gobierno de la mala decisión o hacer que se evite el costo. Los costos hundidos son históricos y, según IPCC (2021), tienen un costo de oportunidad nulo y deben considerarse cosa del pasado.

Sin embargo, estas opiniones deben verse en perspectiva. Según Moretti & Loprencipe (2018), la infraestructura se caracteriza por las siguientes cuatro indivisibilidades: en primer lugar, es indivisible o irreversible en el tiempo. Debe preceder a otras inversiones directamente productivas. En el caso de las carreteras, esto implica que el desarrollo del suelo no puede ocurrir si no hay caminos que vinculen los desarrollos con los mercados externos.

Ahora bien, la interacción económica tendrá lugar si se proporciona la infraestructura vial que une las diferentes regiones económicas. En segundo lugar, su equipamiento tiene una larga durabilidad. Una menor durabilidad es técnicamente imposible o menos eficiente ya que las carreteras suelen diseñarse y construirse para una vida económica de 20 años; así, cualquier tiempo inferior a este es ineficiente debido a las costosas actividades de construcción involucradas.

En tercer lugar, la infraestructura tiene un largo período de gestación. Muchas carreteras tienen volúmenes de tráfico inicialmente bajos después de la construcción, que aumentan con el tiempo. En cuarto lugar, se requiere al menos una combinación mínima de infraestructura para estimular la economía de una zona (Moretti & Loprencipe, 2018). Esta característica implica que las carreteras por sí solas no conducirán al desarrollo, pero que también se requieren otras infraestructuras y actividades para estimular dicho progreso. En síntesis, estas características indivisibles de la infraestructura, y de las carreteras en particular, deben tenerse en cuenta y sus

impactos deben entenderse claramente al considerar el impacto del cambio climático en la infraestructura del transporte.

Externalidades Tecnológicas

Estas externalidades ocurren cuando las empresas o los hogares reciben bienes, servicios, dinero o satisfacción que aumentan su nivel de producción o utilidad, pero por los cuales no pagan, o pagan menos que el precio de equilibrio. Esto se explica con más detalle a continuación. La implicación es que la interdependencia entre las unidades económicas involucradas se encuentra fuera del mecanismo del mercado; IPCC (2021) sostienen que las externalidades de la infraestructura vial que contribuyen al desarrollo económico y a las mejoras en el bienestar son en gran medida externalidades tecnológicas.

En este sentido, un ejemplo de esto es el efecto de la ampliación de la capacidad vial en una red vial congestionada de tráfico. Si el plan resulta en el desvío del tráfico de otras vías congestionadas hacia la vía mejorada, entonces se beneficiarán tanto los usuarios de la nueva vía como los no usuarios (es decir, tanto los nuevos usuarios como los que utilizan las otras vías). Los beneficios para los nuevos usuarios de la vía se relacionan con el uso de una nueva vía que proporcione mejores niveles de servicio, mientras que los usuarios de las otras vías se beneficiarán de una menor congestión debido al desvío de alrededor del tráfico. Esta externalidad positiva constituye una externalidad tecnológica (IPCC, 2021).

Bajo esta perspectiva, el argumento de que esto conduce al desarrollo económico debido a los aumentos en el bienestar no se discute, pero se considera que no refleja todo el impacto en el desarrollo económico, ya que estas externalidades se relacionan únicamente con los beneficios para los usuarios de las carreteras; así, no se consideran otros impactos económicos positivos, ya que aunque son importantes se considera que estas externalidades desempeñan un papel menos significativo en la maximización de los retornos económicos de los planes de inversión vial porque se relacionan únicamente con los beneficios para los usuarios de las carreteras (Olugbem, 2021).

Análisis del Impacto del Cambio Climático en la Infraestructura del Transporte por Carretera de Acuerdo con los Estudios Incluidos en el Repositorio de Investigaciones

La concentración de GEI en la atmósfera proveniente de las actividades humanas ha aumentado la frecuencia de los eventos de cambio climático, que degradan la integridad estructural y el desempeño de la infraestructura de transporte, destacando así la necesidad de políticas que motiven a las personas a modificar los hábitos de consumo de energía y adoptar estilos de vida proambientales.

Al respecto, las redes de infraestructura de transporte son vitales para el funcionamiento de las ciudades en Latinoamérica y en el mundo ya que forman la columna vertebral del comercio, la interacción social y el acceso a los servicios. A pesar de que los sistemas de transporte son esenciales para las actividades económicas, son altamente vulnerables a los impactos del cambio climático; por ejemplo, el aumento del nivel del mar aumenta la gravedad de los daños a la infraestructura, las inundaciones afectan el rendimiento de las redes de transporte al incrementar los tiempos de viaje e interrumpir los viajes personales y comerciales, las olas de calor perjudican la integridad de los pavimentos de las carreteras y los incendios forestales y las tormentas interrumpen el transporte por carretera, ferrocarril y aire (Ennesser, 2014).

Además, la mayoría de los diseños de pavimentos se basan en variables meteorológicas históricas que no tuvieron en cuenta las perturbaciones del cambio climático a lo largo de su vida útil. Por lo tanto, los profesionales del área pueden beneficiarse de la incorporación de proyecciones climáticas en el diseño, la construcción y el mantenimiento de la infraestructura para mejorar la funcionalidad y la confiabilidad de los sistemas de transporte frente al impacto de fenómenos meteorológicos extremos (Ennesser, 2014).

Partiendo de lo anterior, el éxito de las iniciativas de cambio climático y la promulgación de políticas de mitigación y adaptación tanto en Latinoamérica como en el resto del mundo requieren el apoyo y la participación de las partes interesadas, incluido el público en general; así, la colaboración de las partes interesadas como científicos, economistas e instituciones gubernamentales, traduce las soluciones técnicas en recomendaciones de políticas prácticas y

factibles a través del diálogo y las negociaciones. También facilita la producción de ideas y conocimiento compartido, al tiempo que fomenta la colegialidad entre las partes interesadas.

En particular, la realidad de que los eventos extremos agravados por las actividades humanas pueden afectar la infraestructura de transporte ha generado urgencia en comprender lo que se necesitará para movilizar personas y recursos para mitigar tales eventos, y ha llevado a considerables esfuerzos intelectuales y financieros para comprender los impulsores de la acción o la inacción en la mitigación y adaptación a los posibles impactos climáticos. Con este fin, se ha trabajado para involucrar a la comunidad global a través de la concienciación pública con el fin de incorporar el conocimiento y las perspectivas alternativas en el desarrollo de posibles soluciones a problemas globales complejos como el cambio climático (Hendel et al., 2020).

De este modo, es necesario que los organismos nacionales e internacionales también defiendan la participación pública en la formulación de políticas como un componente fundamental del proceso de planificación de la infraestructura del transporte; así, no tener en cuenta las opiniones del público al tomar decisiones sobre la gestión del riesgo climático puede dar lugar a malentendidos, negligencia u oposición, lo que desalienta la necesaria aceptación de las políticas climáticas por parte de quienes se verán afectados por ellas. Por lo tanto, considerando que la preparación para la adaptación requerirá colaboración para resolver problemas colectivos a pesar de los diferentes intereses, perspectivas y áreas de responsabilidad, se debe tener en cuenta al público en general al tomar decisiones sobre el transporte para alentar su aceptación de las políticas relacionadas (Hendel et al., 2020).

Ahora bien, una de las barreras para la participación y la acción pública es el conocimiento limitado sobre las causas y consecuencias del cambio climático. El desempeño de acciones respetuosas con el medio ambiente y la voluntad de comprometerse con esfuerzos de sostenibilidad a largo plazo también dependen en parte del nivel de alfabetización climática de un individuo.

Sin embargo, a pesar del consenso entre los estudiosos de que el cambio climático está ocurriendo, existe un grado de incertidumbre sobre el tema, y el nivel de conciencia pública sobre el tema ha sido bajo y variado, en promedio. El hecho de que el público siga siendo escéptico sobre el cambio climático o la necesidad de tomar medidas se combina con la creciente división

política en los diversos países con respecto al apoyo a las políticas climáticas. Sin embargo, la difusión de conocimientos precisos de forma comprensible puede influir en las actitudes y motivar a las personas a adoptar acciones responsables en apoyo de medidas políticas de protección del clima (Diakakis et al., 2020).

Del mismo modo, aunque existen múltiples beneficios tanto en Latinoamérica como en el resto del mundo en cuanto a la información relacionada con el impacto del cambio climático en la resiliencia de la infraestructura de transporte, existen ciertas barreras para crear conciencia. Estos desafíos incluyen bajo apoyo público, recursos inadecuados, prioridades personales y económicas en competencia, división política y una escasez de discusión pública sobre el cambio climático. Si bien estas barreras potencialmente crean menos oportunidades para el apoyo de políticas de cambio climático, las formas de aumentar la conciencia pública pueden intensificarse a través de programas educativos para mejorar los conocimientos básicos y alentar debates científicos informados y compromisos de múltiples escalas (Diakakis et al., 2020).

De manera similar, algunos sostienen que el uso de las redes sociales también puede optimizarse, con un enfoque en imágenes afectivas para comunicar los riesgos del cambio climático, en donde las historias informativas pueden hacerse personalmente relevantes para personas que tienen puntos de vista y actitudes sesgadas hacia la protección del medio ambiente (Diakakis et al., 2020).

En el marco de estos esfuerzos informativos, los mensajes que difunden temor sobre los efectos devastadores del cambio climático tienen menos impacto que aquellos enfocados en educar a las personas sobre su papel en la mitigación y las posibles medidas de adaptación. En resumen, las investigaciones sobre estos canales informativos sugieren que los esfuerzos para reducir la ignorancia pública pueden facilitar una comprensión más clara de la importancia del tema y aumentar los niveles de concienciación que alentarán las acciones de mitigación a través de modificaciones ambientalmente beneficiosas en el estilo de vida.

En relación con las percepciones sobre el cambio climático; la percepción de un individuo está relacionada con sus creencias, actitudes, juicios y sentimientos, así como con sus disposiciones políticas, culturales o sociales. La percepción del riesgo también está determinada por factores como los valores personales, el nivel de confianza en el gobierno y las instituciones y los sesgos

culturales formados a través de las relaciones sociales. Al igual que muchos problemas ambientales, el cambio climático se vuelve perceptible a través del aumento del conocimiento científico y la conciencia de sus consecuencias adversas obtenidas a través de la observación, la experiencia personal o fuentes de información como los medios de comunicación (IPCC, 2021).

Por otro lado, la percepción errónea de los riesgos del cambio climático en la infraestructura vial puede ser resultado de la ignorancia, la complejidad del problema como tema global, la comunicación ambigua sobre su peligro y las diversas interpretaciones de la información relacionada con el clima. Estas percepciones erróneas pueden constituir una barrera para la participación e inhibir la adopción de estilos de vida respetuosos con el clima (IPCC, 2021).

Debido a la importancia de este concepto para influir en la voluntad de las personas de adoptar estilos de vida respetuosos con el clima a lo largo del tiempo, se debe investigar la diferencia en las percepciones de riesgo de los profesionales del área de infraestructura del transporte por carretera y el público en general para evaluar los niveles de conciencia existentes sobre el cambio climático y sus consecuencias, incluida la determinación del nivel de apoyo que estos respectivos grupos manifiestan para las políticas de reducción de carbono que requieren cambios de comportamiento para mejorar la confiabilidad de la infraestructura de transporte (Blied, 2014).

De esta forma, existe un consenso entre los estudiosos del clima de que las actividades humanas están contribuyendo al calentamiento global. El rápido ritmo del cambio climático tiene un impacto significativo en el transporte debido al aumento extremo de la temperatura, los eventos de precipitaciones intensas y los huracanes, sequías y el aumento del nivel del mar, como los factores más frecuentes. El efecto del cambio climático en la infraestructura del sistema de transporte por carretera se ve exasperado por el hecho de que muchas personas viven en regiones costeras vulnerables a las inundaciones de carreteras, ferrocarriles, sistemas de tránsito y pistas. Además, el costo anual de mantener la red de carreteras resulta costoso, debido al cambio climático (Blied, 2014).

A pesar de su importancia, existe resistencia, creencias falsas y falta de compromiso sobre este tema entre las partes interesadas clave, como el público y los profesionales involucrados en el diseño y la construcción de infraestructura de transporte por carretera. Un estudio sobre el

cambio climático realizado por Cook et al. (2017) sostiene que cuando se le pidió al público que identificara la proporción de estudiosos que están de acuerdo con el calentamiento global causado por el hombre, la respuesta promedio fue de alrededor del 50%. Esta gran brecha de consenso tiene consecuencias en el mundo real, ya que parece que las partes interesadas no comprenden completamente la urgencia y la magnitud del impacto del cambio climático; así, si las partes interesadas clave comprenden correctamente las consecuencias del cambio climático en la infraestructura del transporte, tendrán más probabilidades de adoptar las acciones recomendadas y apoyar las políticas climáticas y los esfuerzos de mitigación.

Además, dado que la adopción de un comportamiento proambiental tendrá un impacto duradero en la forma en que los sistemas de transporte se adaptan al cambio climático en los próximos años, se debe investigar hasta que punto el público en general y los profesionales de la infraestructura del transporte comprenden, interpretan y responden al cambio climático y sus riesgos asociados, además de evaluar los factores que dan forma a las creencias de los grupos interesados y si las diferencias en la percepción obligan o restringen fundamentalmente las adaptaciones de comportamiento proambiental para mitigar las posibles consecuencias del cambio climático en la infraestructura de transporte (Cook et al., 2017).

En relación con la importancia del cambio climático; los resultados de diferentes autores tanto en Latinoamérica como en el resto del mundo han revelado que los profesionales en el área consideraban que el tema del cambio climático era más importante y preocupante que el del público en general; así, los profesionales han estado más preocupados por el problema y su impacto en la infraestructura del sistema de transporte por carretera. También, han tenido una mayor percepción de daño a ellos mismos y a las generaciones futuras. Si bien la conciencia sobre el cambio climático global y como afecta al transporte por carretera es considerablemente alta, el tema sigue siendo de baja prioridad para el público en comparación con otros problemas nacionales y ambientales apremiantes que se perciben como de relevancia local directa y un mayor sentido de urgencia, como la economía, la educación y la atención médica (Cook et al., 2017).

Como resultado, la abstracción del cambio climático y la intangibilidad percibida de sus consecuencias asociadas impactan tanto el nivel de atención que se presta a su urgencia como la voluntad de participar en comportamientos proambientales para abordar el problema; así, la

implicación de una percepción reducida del riesgo o la trivialización de las consecuencias del cambio climático y su relación con la infraestructura del sistema de transporte por carretera, si no se controla, es una barrera potencial para la participación pública que puede paralizar la motivación para tomar acciones personales para mitigar el problema. Por lo tanto, los últimos estudios alientan a los tomadores de decisiones a estar atentos y receptivos a la percepción errónea del público y su posible influencia en los esfuerzos de mitigación exitosos (Cook et al., 2017).

En cuanto al conocimiento del cambio climático; los análisis de los estudiosos han revelado que más profesionales del área tenían un conocimiento significativo del tema y coincidían en que el cambio climático y su implicación en la infraestructura del sistema de transporte por carretera es causado por el CO₂ producido por las actividades humanas. Aunque una proporción considerable del público en general entendía que el dióxido de carbono es el que más aumenta en la atmósfera, cuando se evaluó el conocimiento del cambio climático y la conciencia de su causa y consecuencias, relativamente menos personas eran conscientes de los hechos científicos sobre el tema (incluida la sustancia que más aumenta en la atmósfera debido al cambio climático) y mostraron más dificultad para discernir el CO₂ producido por la actividad humana, el CO₂ natural y la lluvia ácida como causa del cambio climático (IPCC, 2013).

De esta forma, mientras que algunos estudios sugieren que los valores culturales y las creencias políticas tanto en Latinoamérica como en el resto del mundo juegan un papel notable en el escepticismo sobre el cambio climático y su implicación en la infraestructura del sistema de transporte por carretera, otros han identificado ignorancia o malentendidos por parte del público. Por ejemplo, un estudio temprano observó que el público comúnmente confunde el cambio climático con otros problemas ambientales, como el agotamiento del ozono estratosférico, la contaminación del aire y el clima, debido a la falta de educación enfocada en el tema; consecuentemente, la ignorancia sobre el tema y la renuencia a tomar acciones de mitigación se ha atribuido a una variedad de factores incluyendo la fatiga climática, el escepticismo, las representaciones engañosas de los medios de comunicación y la incapacidad de comprender el tema (IPCC, 2013).

En particular, algunas personas rechazan el cambio climático causado por el hombre porque carecen de conocimiento del consenso científico debido a la complejidad del asunto. Además,

las personas generalmente están influenciadas por conceptos que son fáciles de visualizar, pero para muchos, temas como el cambio climático parecen abstractos o amorfos. Esto puede explicar por qué las personas pueden centrarse en facetas simples y de corto plazo del tema, como las olas de calor y los incrementos de temperatura, en lugar de conceptos detallados a largo plazo del cambio climático y su relación con la infraestructura del transporte por carretera (IPCC, 2013).

Por lo tanto, aumentar la alfabetización científica a través de la difusión de información científica precisa es importante para que el público comprenda la amenaza que plantea el cambio climático a fin de lograr que el público se sume al apoyo de las políticas y las estrategias de adaptación necesarias para reducir el efecto del cambio climático en la infraestructura del sistema de transporte por carretera.

En cuanto a la conciencia de las consecuencias del cambio climático; aunque existe consenso científico de que los gases de efecto invernadero (GEI) han afectado significativamente al clima mundial con consecuencias adversas para los sistemas humanos y naturales, la conciencia de su impacto en los sistemas humanos y naturales no parece alta entre el público en general. De esta forma, los profesionales relacionados con la infraestructura transporte por carretera creen que el cambio climático afectaría negativamente a los sistemas de transporte, aumentaría el riesgo de retrasos e interrupciones en los sistemas de transporte por carretera y probablemente se agravaría por los viajes en automóvil y camión en los próximos tres años (Qualtrics Seattle, 2021).

Igualmente, considerando el impacto de los eventos climáticos extremos en la infraestructura, puede ser beneficioso informar al público sobre las ventajas de las medidas proactivas de mitigación y adaptación para reducir la gravedad de los eventos relacionados con el cambio climático. Sin embargo, más personas que los profesionales del área tienen creencias normativas más fuertes sobre el tema y consienten en que el gobierno y otras personas significativas esperan que tomen acciones de mitigación para aliviar el impacto del cambio climático en los sistemas de transporte. Así, el sentido de urgencia asociado a la cuestión del cambio climático y la voluntad de llevar a cabo una conducta proambiental pueden estar mediados por las noticias y otras fuentes publicadas de las que depende el público para ampliar su conocimiento sobre cuestiones ambientales y su relación con la infraestructura del sistema de transporte por carretera tanto en Latinoamérica como en el resto del mundo (Qualtrics Seattle, 2021).

En relación con la creencia sobre el cambio climático; los resultados de diferentes estudiosos han revelado que los profesionales en infraestructura del transporte por carretera poseen creencias más fácticas sobre el cambio climático, con una mayor proporción de ellos indicando que la quema de combustibles fósiles ha causado graves daños al clima del planeta y que la mayor parte del calentamiento global se debe a un aumento de los GEI y las emisiones humanas de CO₂ (Sventeková et al., 2020).

Además, un mayor porcentaje del público en general tiene ciertas percepciones erróneas sobre el tema al asumir incorrectamente que el cambio climático y su implicación en la infraestructura del sistema de transporte por carretera es solo una fluctuación natural y que los humanos son demasiado insignificantes para tener un impacto real en la temperatura global. Por otra parte, aunque existe consenso en los estudiosos del clima de que el calentamiento global causado por el hombre está sucediendo, estudios previos han observado que la mayoría de las personas tienden a descartar la ciencia del clima y expresan cierto grado de incertidumbre de que el cambio climático esté ocurriendo o la necesidad de que el tema esté entre las principales prioridades en Colombia (ONU, 2015).

Del mismo modo, varios factores influyen en las percepciones erróneas, como las características individuales, la cultura y el estado socioeconómico, la falta de experiencia personal de eventos extremos, creencias personales que hacen que la mayoría de las personas rechacen información que contradice la opinión predominante o "seleccionen" datos climáticos para respaldar suposiciones personales, orientación política, conocimiento limitado relacionado con el clima, como el impacto de las emisiones de GEI en el medio ambiente y presentación de la información sobre el cambio climático en los medios como controvertida e incierta.

Así, las creencias inexactas debido a la desinformación o modelos mentales incorrectos relacionados con el tema tienen consecuencias ambientales negativas que subrayan la necesidad de difundir información científica precisa que influya en el apoyo político a las acciones de mitigación y la voluntad de adoptar un comportamiento proambiental en el tema de la infraestructura del sistema de transporte por carretera (Sventeková et al., 2020).

En cuanto a las intenciones de búsqueda de información; de manera un tanto inesperada, el público en general ha tenido una menor intención de buscar información sobre el cambio

climático que los profesionales relacionados con la infraestructura del transporte. El público, en un porcentaje mayor que los profesionales saben lo suficiente; así, estos hallazgos pueden deberse a una variedad de factores, incluida la diversidad de medios y fuentes de información interpersonal que impiden la comprensión, la visión pública del tema como abstracto, distante e impersonal, la politización del tema o una capacidad reducida para procesar hechos debido a un conocimiento previo limitado, una visión del mundo o factores sociales e institucionales (Sventeková et al., 2020).

Además, a pesar de la importancia de la comunicación interpersonal sobre la incidencia del cambio climático en la infraestructura del transporte, la mayoría de las personas rara vez discuten el tema con familiares y amigos. La comunicación interpersonal sobre el cambio climático es fundamental para aumentar la comprensión pública del problema y generar compromiso comunitario. De la misma manera, los marcos sociales y morales de la información relacionada con el clima (como compartir historias personales y narrativas de experiencias cotidianas sobre cómo el cambio climático daña a las personas y empeora la funcionalidad de la infraestructura) pueden clarificar la ciencia compleja con narrativas comprensibles, en lugar de comunicar hechos y cifras o información puramente científica; así, se necesita más investigación empírica para analizar los procesos o mecanismos detrás de estas intenciones conductuales.

En cuanto a los esfuerzos de conservación de energía; los resultados han revelado que los profesionales relacionados con la infraestructura del transporte han expresado una mayor disposición a minimizar en gran medida el efecto negativo del cambio climático en los sistemas de transporte. Sin embargo, reconocieron que llevar a cabo acciones de mitigación como reciclar, conducir menos y reducir el uso de electricidad requiere esfuerzos conscientes, tiempo y conocimiento (Pérez-Morales et al., 2019).

De allí, los resultados coinciden con estudios anteriores en los que algunas personas mostraron preocupación y participaron en acciones para mitigar y adaptarse a la crisis global, mientras que otras parecían dudar en aceptar, apoyar o participar activamente en actividades que representan buenas prácticas ambientales por razones como la ausencia de motivación, una tendencia a priorizar el interés propio y subestimar el medio ambiente, malestar con la realización del comportamiento, falta de recursos para tomar medidas y barreras psicológicas que incluyen actitudes negativas de ideologías personales. Además, algunas personas no saben por dónde

empezar o no pueden comprender las acciones de mitigación adecuadas para reducir las concentraciones atmosféricas de GEI (Pérez-Morales et al., 2019).

Por ejemplo, en consonancia con los hallazgos de estudios anteriores, los esfuerzos se orientan hacia comportamientos de bajo impacto, como el reciclaje y la reducción de residuos en carreteras, cuando se debaten formas de abordar el cambio climático, mientras que las acciones de mayor impacto como conducir de manera económica o reducir el consumo de energía, generalmente se minimizan. De hecho, adoptar medidas proambientales es un desafío y, a veces, requiere inversiones monetarias, un esfuerzo significativo o una comodidad o conveniencia reducidas que pueden hacer que las personas prioricen opciones que son convenientes o económicas. Otros constructos psicosociales, como los valores, las creencias, las actitudes, las normas subjetivas y el control conductual percibido, desempeñan un papel importante a la hora de influir en las opciones conductuales respetuosas con el medio ambiente (Pérez-Morales et al., 2019).

De tal forma, las respuestas conductuales a cuestiones sociales controvertidas, como el cambio climático, suelen imponerse de acuerdo con las expectativas sociales que pertenecen a reglas pasivas para regular dicho comportamiento, que son susceptibles a posibles sesgos de los medios de comunicación y de los procesos psicológicos internos. Como resultado, los individuos pueden tener intenciones positivas de participar en comportamientos ambientalmente responsables si se identifican con las normas sociales que refuerzan el desempeño del comportamiento, o pueden verse inhibidos de participar en acciones colectivas si no perciben el apoyo de los demás en relación con la conservación de la energía y el cumplimiento de las políticas de reducción de carbono.

Por lo tanto, los hallazgos bibliográficos alientan los esfuerzos de intervención educativa pública, como los programas de divulgación que abordan el desafío de la alfabetización climática al ilustrar cómo el consumo descontrolado de energía puede reemplazarse con actividades que mitiguen eficazmente el efecto negativo del cambio climático. Al involucrar a la educación pública en torno a intervenciones que fomenten estilos de vida de bajo consumo de energía y busquen reducir las barreras económicas, socioculturales, políticas y estructurales para la conservación de la energía, los responsables de las políticas pueden encontrar mayores beneficios en las acciones colectivas proambientales.

En consonancia con la observación de estudios anteriores, las acciones adoptadas por las personas para considerar modos de transporte con emisiones de carbono reducidas o nulas aún tienen margen de mejora, y este cambio de comportamiento parece ser la acción conservacionista menos apoyada tanto por los profesionales como por el público. La mayoría de las sugerencias de los profesionales de la infraestructura del transporte para combatir el cambio climático se centran en fomentar la reducción del uso de energía para la movilidad priorizando los modos no motorizados sobre los modos vehiculares, y el transporte público en la carretera sobre los viajes en automóvil privado (PMIC, 2021).

Igual, la infraestructura del sistema de transporte por carretera genera relativamente menos emisiones de carbono debido a la ventaja de transportar más pasajeros a la vez y son más eficientes en el uso de la energía y la tierra que los viajes en automóvil, lo que produce una disminución correspondiente de los contaminantes del aire y otras externalidades vinculadas a la automovilidad. El ciclismo también es rentable y reduce el consumo de energía y la contaminación ambiental, proporcionando transporte, salud y beneficios sociales, como un menor gasto económico y relajación mental; no obstante, aunque el automóvil es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de GEI y a la contaminación del aire, sigue siendo el modo de transporte ampliamente preferido en carretera (Liao et al., 2018).

Sin embargo, la falta de voluntad del público en general para modificar su comportamiento de viaje puede ser resultado de barreras psicológicas, sociales, económicas y físicas, como el esfuerzo, los costos financieros relativos y la aprobación social. Estas incluyen la concesión de un valor superior a la identidad, la imagen y el reconocimiento social a la conducción de un automóvil, mientras que se descuidan las preocupaciones sobre sus impactos ambientales, sentimientos de impotencia y resignación ante los problemas globales, desánimo para tomar medidas cuando los individuos perciben negativamente la reducción de los esfuerzos de mitigación por parte de otros y resistencia a aceptar la responsabilidad personal mediante la adopción de mecanismos de negación para trasladar la culpa a los gobiernos, las empresas u otros (Liao et al., 2018).

Por lo tanto, es necesario desarrollar la conciencia ambiental entre el público en general fomentando la adopción de modos de transporte en carretera con cero o reducidas emisiones de carbono siempre que sea posible, así como utilizando una combinación de intervenciones

educativas, regulaciones, incentivos y modificaciones del uso del suelo. Por ejemplo, las políticas sobre los beneficios de los automóviles de empresa pueden modificarse para considerar la ventaja de reducir las emisiones de carbono de los viajes de pasajeros.

En relación con el Control conductual percibido (CCP); el público en general según los estudios de Liao et al. (2018), registró niveles altos de percepción de control conductual. También, han expresado confianza en su capacidad para tomar medidas para aliviar el impacto del cambio climático en los sistemas de transporte; igual, los profesionales relacionados con infraestructura del transporte pueden descartar su capacidad para reducir las consecuencias negativas del cambio climático debido a la creencia de que la frecuencia de las emisiones de carbono generadas por otros modos de transporte como el transporte de mercancías por carretera, puede disminuir la potencia de sus acciones individuales y pueden centrarse en políticas ambientales que tendrán un impacto tangible en la mejora de la confiabilidad a largo plazo de la infraestructura de transporte ante el impacto adverso del cambio climático (Liao et al., 2018).

En cuanto al apoyo a la investigación sobre el cambio climático; se ha encontrado que los profesionales de la infraestructura del transporte han apoyado la investigación sobre el efecto del cambio climático en los sistemas de transporte y su financiación; así, la inversión es fundamental para abordar la crisis climática global en las áreas de desarrollo tecnológico, mejora del conocimiento y creación de capacidad a nivel local, nacional y global (IPCC, 2022).

También, existen preocupaciones emergentes con respecto a si los fondos externos coinciden con las necesidades locales para continuar con la investigación y el desarrollo de infraestructura urbana sostenible, la preferencia por resultados cuantificables a corto plazo a expensas de estudios a más largo plazo con mayor impacto económico y los criterios utilizados para priorizar las necesidades de investigación.

Tal priorización podría abordar, por ejemplo, la elección de la investigación sobre el avance de remedios tecnológicos para el cambio climático por parte de estudiosos y técnicos o una investigación sobre actitudes, normas, incentivos y políticas relacionadas con el cambio climático por parte de investigadores de ciencias sociales. Por lo tanto, es necesario mejorar la coordinación y la transparencia del financiamiento para garantizar que los recursos financieros se integren en los planes nacionales de desarrollo en Colombia y se asignen de manera más

eficiente para abordar las lagunas de conocimiento en la investigación climática tanto natural como social (IPCC, 2022).

Igualmente, el grado en que la infraestructura del sistema de transporte por carretera puede verse afectada por fenómenos meteorológicos intensos también requiere la necesidad de sinergias de investigación organizadas entre estudiosos atmosféricos, partes interesadas en el transporte, organizaciones no gubernamentales y grupos de defensa del medio ambiente. Algunos ejemplos para el transporte incluyen una evaluación del desempeño de las organizaciones de planificación metropolitana en la implementación de estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que produce el transporte (Santos et al, 2021).

Por lo tanto, un enfoque de ciclo de vida para cuantificar las huellas de energía y carbono de la infraestructura de transporte urbano, necesita el desarrollo de un marco para integrar el riesgo de falla de la infraestructura en las prácticas de gestión de activos de transporte, la construcción de modelos climáticos para evaluar el riesgo de calentamiento global futuro y la necesidad de lograr emisiones netas cero, el desarrollo de un marco métrico para medir la resiliencia del servicio ferroviario de pasajeros al riesgo climático y rastrear los cambios a lo largo del tiempo y la investigación de la resiliencia de la infraestructura de transporte a la recuperación de desastres naturales, así como el impacto de las estrategias de protección contra el aumento del nivel del mar en varios modos de transporte.

Por otra parte, la construcción de sistemas de transporte e infraestructuras son responsables de varios impactos positivos y negativos. Los impactos positivos están relacionados principalmente con la creación de muchos puestos de trabajo, la conexión de zonas aisladas, la mejora de la logística y el transporte de mercancías. Todos ellos son esenciales para el desarrollo humano. No obstante, son responsables de impactos negativos, como el consumo exacerbado de los recursos naturales y el aumento de las emisiones, especialmente las de gases de efecto invernadero (GEI), que pueden afectar y cambiar gravemente el paisaje natural (Larsen, 2008).

Actualmente, aunque la mayoría de los estudios se han centrado en el cambio climático y el sector vial en el contexto general, principalmente enumerando estrategias de mitigación, un número cada vez mayor de estudios se han diseñado para evaluar y documentar los impactos del cambio climático en la infraestructura de transporte por carretera, proporcionando orientación

sobre los tipos de impactos potenciales y posibles estrategias para adaptarse a estos impactos (Larsen, 2008).

La razón es que, cualesquiera que sean los escenarios de calentamiento y por exitosos que sean los esfuerzos de mitigación, el impacto del cambio climático y sus costos económicos, ambientales y sociales aumentarán en las próximas décadas. Es de destacar, que no todos los estudios incluidos en la base de datos están enfocados al transporte por carretera, muchos de ellos tratan sobre infraestructura crítica en general y aportan algunas reflexiones sobre el sector.

Ahora bien, para desarrollar medidas de adaptación apropiadas al contexto, primero es necesario identificar dónde se localizan las amenazas climáticas y los impactos biofísicos más intensos. Decidir la asignación más apropiada de estos recursos a proyectos potenciales representa una de las funciones más esenciales de los planificadores de infraestructura.

Según el IPCC (2022), para los análisis de Evaluación de Riesgo Climático en la infraestructura del sistema de transporte por carretera se deben considerar tres componentes: amenaza climática, exposición y vulnerabilidad (sensibilidad y capacidad de adaptación). Este análisis, debe considerar herramientas para apoyar a los tomadores de decisiones utilizando datos observacionales y/o experimentales y modelos de simulación de escenarios para cuantificar los impactos de eventos extremos y cambio climático incremental e identificar puntos críticos en la red vial en cualquier ubicación geográfica en todo el mundo.

Sin embargo, a través de la revisión de la literatura, se encontró que generalmente los estudios no hacen mención de las mejores estrategias para identificar amenazas e impactos, considerando solo medidas de adaptación sin ninguna identificación del historial de implementación de modelos climáticos para análisis futuros (Moretti, 2018).

Otro punto que vale la pena mencionar, es la identificación de los principales impactos que las amenazas climáticas pueden causar sobre los distintos tipos de infraestructura vial crítica. Durante esta revisión, se encontró que la mayoría de los estudios, han analizado la infraestructura en su conjunto; es decir, no analizan las carreteras (pavimentación, por ejemplo), las estructuras especiales (puentes, viaductos, entre otros), o las estructuras actuales (sistemas de drenaje, por ejemplo) por separado. La explicación es que, en muchos casos, la disponibilidad

de datos sobre elementos que soportan las carreteras, especialmente sobre drenaje, es aún más escasa. Por lo tanto, se cree que esta brecha en la literatura necesita ser mejor abordada en el futuro porque cada una de estas infraestructuras tiene características que pueden hacerla más vulnerable a ciertas amenazas e impactos biofísicos (Bles et al., 2014).

Por ejemplo, los puentes son altamente vulnerables a la corrosión intensificada por las inundaciones, mientras que los sistemas de drenaje pueden verse comprometidos por la erosión de las carreteras. Es importante entender, que los impactos del cambio climático en la infraestructura vial en términos de mantenimiento, reparaciones y pérdida de conectividad se pueden minimizar e incluso evitar mediante la implementación de medidas de adaptación proactivas que son cruciales para proteger las inversiones actuales y futuras en infraestructura y las funciones económicas, sociales y de otro tipo que desempeñan como la adaptación dura y la blanda.

Vale la pena señalar, que la adaptación dura consiste en modificaciones estructurales como la protección de los corredores viales con estructuras de ingeniería y el rediseño o reubicación de las instalaciones viales y la adaptación blanda abarca políticas, asignaciones de uso de la tierra, educación y participación social (Bles et al., 2014).

Además, si bien se pueden implementar diferentes adaptaciones duras para cada tipo de amenaza y el impacto biofísico correspondiente (por ejemplo, la irrigación de pavimentos es adecuada en el contexto de altas temperaturas y el pavimento permeable es adecuado en el contexto de precipitaciones intensas), se puede aplicar una adaptación blanda a contextos generales que abarcan todas las principales amenazas climáticas y sus respectivos impactos. Se enfatiza que estas medidas de adaptación (ya sean duras o blandas) ofrecen una forma factible y potencial de preparar el sistema de transporte para los impactos del cambio climático y ayudan a hacerlo más resistente, flexible y operativo en condiciones adversas si se implementan adecuadamente (Bles et al., 2010).

Sin embargo, al evaluar cualquier solución, se deben tener en cuenta los impactos negativos en la inversión, el acceso público y las instalaciones. Además, las acciones pueden ser sensibles al tiempo y la colaboración entre agencias autorizadas es particularmente importante para la evaluación de riesgos y la evaluación de la viabilidad de la solución. Con una lectura exhaustiva

de los estudios incluidos en la base de datos, se cree que los tomadores de decisiones deben desarrollar una política de adaptación al cambio climático y un documento de estrategia de implementación, es decir, un plan de adaptación, que tenga en cuenta los impactos en los activos, sistemas, operaciones y recursos.

Este plan de adaptación, debe articular la necesidad de adaptación y los intereses de las partes interesadas, incluyendo (i) la consideración de las necesidades de adaptación en todos los proyectos nuevos o en curso, (ii) el detalle de las diversas acciones de operaciones y mantenimiento para aumentar la resiliencia del sistema a eventos climáticos más frecuentes y/o severos, y (iii) el desarrollo de un análisis de riesgos de todo el sistema de los activos existentes. Se debe prestar atención, a los sistemas de gestión de emergencias, que, cuando son eficaces, son de vital importancia para minimizar los posibles daños resultantes de un desastre determinado; así, diversos autores han señalado que las medidas de adaptación que integran soluciones tecnológicas, naturales y sociales pueden proporcionar diversos beneficios colaterales para abordar cuestiones socioecológicas complejas en las ciudades al aumentar la resiliencia a los posibles impactos (Bessembinder, 2014).

Por lo tanto, existe la necesidad de crear soluciones climáticas integradas para fortalecer la resiliencia climática urbana y delinear formas de superar la variedad de desafíos que obstaculizan la integración. Aunque algunas soluciones pueden tener un efecto tangible inmediato, otras pueden ser efectivas solo una vez que permitan que las soluciones entren en vigor (por ejemplo, desarrollar vías adaptativas que permitan considerar los problemas actuales al planificar cambios futuros; mantener la flexibilidad en la planificación para permitir cambios en las soluciones a lo largo del tiempo y crear soluciones con muchos beneficios colaterales que aborden los problemas actuales pero no creen adaptaciones deficientes para cambios futuros) (Bessembinder, 2014).

También, es importante destacar que, si bien las decisiones de inversión en carreteras suelen hacer hincapié en aumentar la cantidad y la calidad de infraestructura mediante un enfoque en la construcción y en enfoques básicos de análisis de costos y beneficios, es necesario identificar las brechas en la inversión en infraestructura, en particular en los países en desarrollo, como resultado de eventos climáticos extremos, que a menudo se deben a una falta de capacidad técnica y estructura institucional para respaldar proyectos exitosos (Bessembinder, 2014).

Por lo tanto, se debe desarrollar una estructura organizacional sólida, que incluya la recopilación y el manejo adecuados de datos, la identificación de las mejores prácticas globales en materia de adaptación al cambio climático y la incorporación del conocimiento tácito de los expertos en transporte para expandir el conocimiento sobre el cambio climático a fin de generar conciencia y llevar la agenda climática a nivel público y privado.

Afectación de la infraestructura vial por el clima. Caso práctico: Colombia desde un punto de vista global

Los impactos relacionados con el clima ya han sido la causa de una destrucción sustancial y costosa en Colombia. Como la mayoría de los colombianos saben intuitivamente, los dos peligros más importantes para el sistema vial son los deslizamientos de tierra y las inundaciones; consecuentemente, las proyecciones analizadas anteriormente demuestran que es probable que la gravedad de cada uno de estos peligros se intensifique en los próximos años a medida que cambia el clima, lo que sugiere un posible aumento de los costos y los daños.

Dentro de este contexto, las lluvias más extremas y la actividad de tormentas severas, incluidos los eventos de La Niña, desencadenan una serie de impactos que afectan las carreteras. En particular, las inundaciones y los deslizamientos de tierra causados por fuertes precipitaciones tienen graves consecuencias tanto para la seguridad humana como para las condiciones de la infraestructura (IDEAM, 2022). Estos peligros, también se ven exacerbados por factores de estrés antropogénicos como el desarrollo, la deforestación y el crecimiento demográfico; en consecuencia, comprender el riesgo actual de estos peligros proporciona una visión a través de la cual ver los riesgos futuros, ya que pueden cambiar con el clima. Los años recientes, indican una correlación entre los efectos de La Niña con altas precipitaciones con un mayor número de deslizamientos de tierra e inundaciones dañinos.

Así mismo, el incremento de las precipitaciones intensas puede provocar un aumento de los accidentes relacionados con el clima y de las perturbaciones durante los aguaceros, y las inundaciones asociadas. En la actualidad, alrededor del 45% de la infraestructura de la red vial es muy vulnerable a las inundaciones. De tal manera, las inundaciones de las carreteras pueden provocar un aumento de la mortalidad y las lesiones, interrumpir el comercio y provocar pérdidas económicas; igual, dañar las carreteras, los puentes y los sistemas de drenaje (IDEAM, 2023).

De la misma manera, el riesgo de inundaciones se agrava en las zonas costeras, donde las inundaciones pueden ser más graves debido al aumento del nivel del mar. En los últimos cinco (5) años, de acuerdo IDEAM (2024), la mayoría de las inundaciones (alrededor del 70%) y los daños asociados al sistema vial ocurrieron en la Región Andina.

Del mismo modo, se presenta una superposición de las áreas históricamente susceptibles a inundaciones con proyecciones regionales de áreas vulnerables a fuertes precipitaciones hasta el año 2040 para los meses de marzo a mayo. Los corredores expuestos a este riesgo incluyen los corredores Montería-Coveñas y Cauca-La Apartada ubicados en los departamentos de Córdoba y Antioquia, respectivamente (IPCC, 2021). El área metropolitana de Bogotá también es vulnerable, como lo demostraron las inundaciones de 2020-2021: muchas de las vías al este de la montaña y adyacentes a la capital se inundaron, causando daños significativos como los descritos anteriormente.

Debido a las altas precipitaciones anuales de Colombia, la topografía montañosa y las frecuentes actividades sísmicas y volcánicas, los deslizamientos de tierra son peligros frecuentes en el país y plantean riesgos significativos para el sistema vial. Dichos deslizamientos, pueden volverse más predominantes con un incremento en los eventos de fuertes precipitaciones, lo que lleva a un aumento en los cierres de carreteras y demoras y costosos daños a la infraestructura.

En general, la mayoría de las inundaciones y deslizamientos de tierra con impactos en el sistema vial históricamente han tenido lugar en la región andina, con un tercio de todos los eventos de riesgo en esa región ocurriendo entre marzo y mayo. En contraste, la región del Caribe experimenta más deslizamientos de tierra e inundaciones entre septiembre y noviembre. Al igual que las inundaciones, la mayoría de los deslizamientos de tierra (alrededor del 90%) y los daños asociados a las carreteras y puentes de los últimos cinco (5) años ocurrieron en la región andina (IDEAM, 2023).

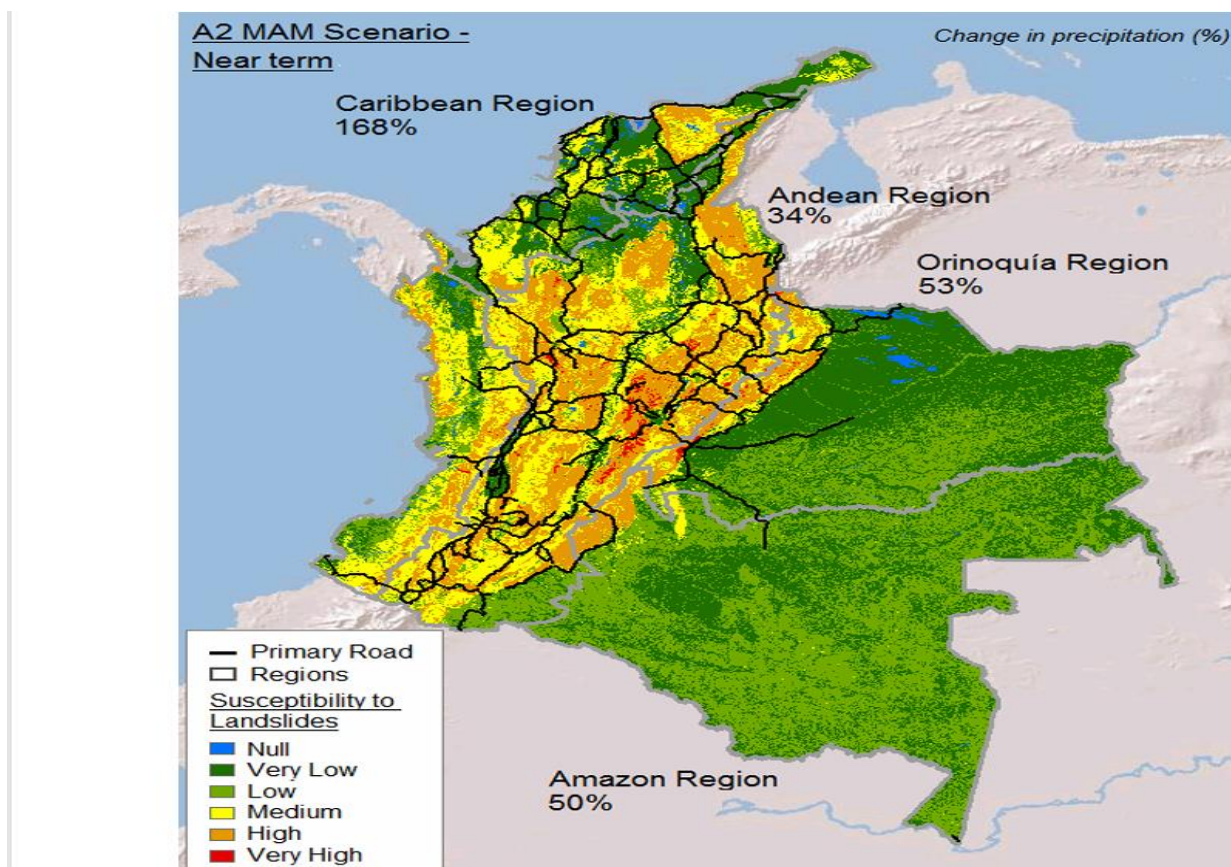
Consecuentemente, como los deslizamientos de tierra son un peligro natural para el sistema vial primario, es importante considerar cómo pueden cambiar los deslizamientos de tierra bajo un clima cambiante. La Figura 1, proporciona una superposición de áreas históricamente susceptibles a deslizamientos de tierra con proyecciones regionales de áreas vulnerables a eventos de fuertes precipitaciones e inundaciones hasta 2040 (Blüed et al., 2014).

Tener en cuenta, que si bien se proyecta que todas las regiones bajo este escenario experimentarán una mayor precipitación que teóricamente podría aumentar la amenaza de deslizamientos de tierra, la lluvia puede no ser el factor limitante, otros factores críticos como la topografía y la cobertura del suelo deben estar en su lugar.

Dicho esto, dado que la Región Andina es la que corre el mayor riesgo de deslizamientos de tierra, este análisis cualitativo indica que el riesgo de deslizamientos de tierra puede aumentar; de tal modo, la carretera Honda-Villeta, ubicada entre Bogotá y el río Magdalena, es uno de los corredores más expuestos a este peligro natural (UNGRD, 2023). Otros corredores altamente susceptibles incluyen el corredor Silvana-Girardot y el corredor Villavicencio-Granada ubicados al sur y este de la capital, respectivamente.

Figura 1

Áreas vulnerables a eventos de fuertes precipitaciones e inundaciones (Colombia)



Nota. Tomado de Blied et al. (2014).

Dentro de este contexto, con relación a los impactos del fenómeno La Niña en Colombia; este evento ilustra lo perjudicial que puede ser un período de lluvias inusualmente extremo para el sistema de transporte de Colombia y las localidades más vulnerables. Este fenómeno afectó a 4 millones de personas, causó 491 muertes y destruyó o dañó 562.000 viviendas (MADS, 2023). Un total de 98 carreteras principales resultaron dañadas, lo que provocó retrasos en la distribución y el aumento de los precios de los productos básicos. Las regiones del Caribe y Andina del país fueron las más afectadas y registraron niveles de precipitación que superaron los récords históricos. La deforestación agravó las inundaciones y los deslizamientos de tierra (Ministerio de Transporte, 2023).

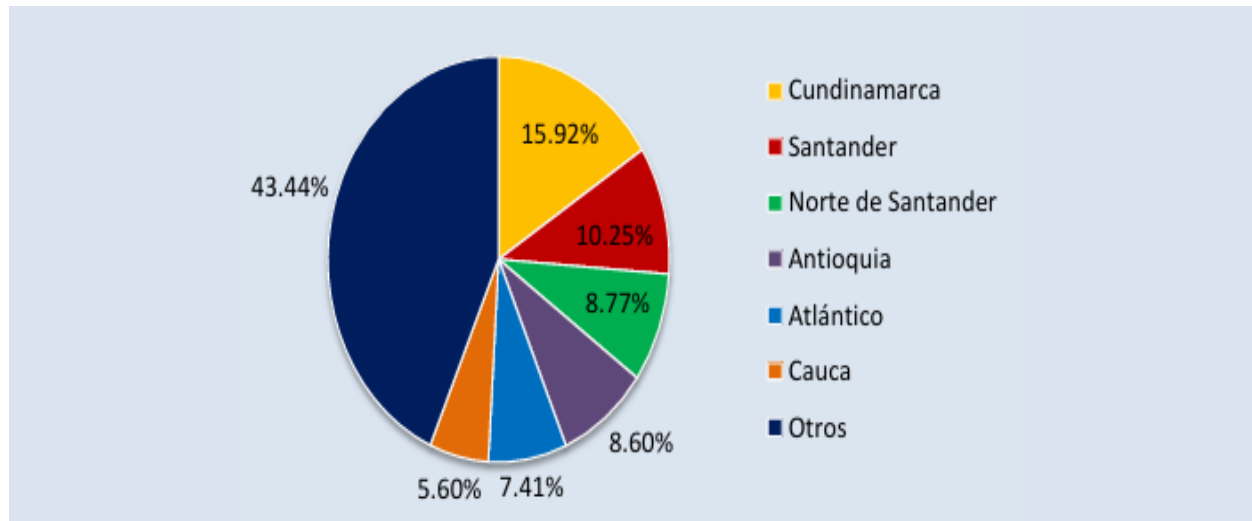
En la cuenca del río Magdalena-Cauca, la deforestación provocó un aumento de la erosión y la sedimentación, lo que agravó aún más los impactos causados por las inundaciones. Si bien las inundaciones fueron extensas y dramáticas, el daño causado a la infraestructura, como carreteras y acueductos, fue causado por grandes deslizamientos de tierra y movimientos en masa (MADS, 2023).

Igualmente, los desastres naturales (por ejemplo, inundaciones y deslizamientos de tierra) causados por los severos meses de diciembre a febrero durante el fenómeno de La Niña de 2010-2011 resultaron en pérdidas económicas totales de más de USD 6.200 millones, de los cuales USD 1.900 millones se asignaron al sector del transporte. El transporte de carga se vio gravemente afectado y los desvíos y las interrupciones del flujo de tráfico resultantes causaron pérdidas de aproximadamente USD 222 millones (Ministerio de Transporte, 2023).

En síntesis, el fenómeno de La Niña ha impactado la infraestructura en el transporte. La pérdida en el sector por sí solo requiere una inversión de más del 0,5% del PIB. Al compararlo con niveles de inversión anteriores de menos del 1%, el impacto del fenómeno La Niña es claro; así, de acuerdo con la figura siguiente, los departamentos que sufrieron las mayores pérdidas en el transporte de carga se muestran en la figura siguiente. El departamento de Otros fue el más afectado, experimentando una pérdida desproporcionada de más del 43%.

Figura 2

Participación por departamentos en pérdidas en el transporte de carga, ocasionadas por los desastres de diciembre-febrero del evento La Niña



Nota. Tomado de Ministerio de Transporte, 2016.

En esta misma perspectiva, con relación a los impactos asociados con el aumento del nivel del mar y las marejadas ciclónicas; a medida que aumenta el nivel del mar, la infraestructura y otros activos al nivel del mar o cerca de él pueden inundarse con mayor frecuencia o gravedad. Se estima que un aumento del nivel del mar de 1 metro podría afectar a entre 1,4 y 1,7 millones de personas en Colombia (ICF, 2023); por lo tanto, lo anterior constituye una preocupación a lo largo de las costas de la región del Pacífico y el Caribe, por lo que a medida que aumenta el nivel del mar, algunas carreteras costeras y bajas y túneles subterráneos pueden verse afectados por inundaciones que podrían causar cierres y retrasos en el tráfico.

Además, la infraestructura puede resultar dañada por la erosión de las bases de las carreteras y el socavamiento de los soportes de los puentes; también, con el aumento del nivel del mar, la altura del agua de la marejada ciclónica asociada con las tormentas tropicales aumentará correspondientemente, lo que permitirá que la marejada y las olas se desplacen más tierra adentro. Esto causará una mayor erosión de la costa y daños locales a las carreteras existentes, y puede afectar la ubicación y el diseño de futuras carreteras, puentes y túneles.

En cuanto a los impactos asociados con el aumento de las temperaturas y los extremos térmicos, el aumento de las temperaturas y los extremos térmicos pueden afectar a los sistemas viales al afectar los materiales del pavimento y las condiciones ambientales que impactan en las carreteras (IPCC, 2022). Las altas temperaturas pueden provocar la fatiga de los materiales; así, el incremento de las temperaturas también puede alterar los patrones de vegetación que afectan la infraestructura vial.

Por ejemplo, la vegetación utilizada para el control de la erosión puede no prosperar bajo temperaturas más altas, por lo que la flora acuática invasiva puede obstruir los sistemas de drenaje. Las operaciones humanas (reparaciones y mantenimiento de carreteras, control del tráfico) pueden verse afectadas por las altas temperaturas; a menudo, se imponen limitaciones a la cantidad de tiempo que el personal de operaciones puede trabajar en condiciones de alta temperatura (por ejemplo, más de 32 °C) (Burkett, et al, 2018).

Igual, en los casos en que los eventos de calor ocurren después de eventos de fuertes precipitaciones, la humedad local puede exacerbar la "sensación" de temperaturas en las personas; así, de acuerdo con Burkett et al. (2018) un día de 31 °C con una humedad relativa del 70% puede afectar al cuerpo humano tanto como un día de baja humedad, 37 °C. Además de afectar directamente a la infraestructura de transporte, el cambio climático también tendrá implicaciones para los servicios ecosistémicos que son sustentados por el transporte. Por ejemplo, los impactos del cambio climático en los páramos podrían tener efectos adversos en la red vial de Colombia.

Con relación a los múltiples factores de estrés y vulnerabilidades; es importante reconocer los efectos combinados del cambio climático a medida que se desarrollan planes para la ubicación, el diseño, la construcción, el funcionamiento y el mantenimiento de las carreteras del país. La combinación de eventos de precipitaciones más intensas y el aumento del nivel del mar puede dar lugar a inundaciones costeras aún más graves.

Ahora bien, en el caso de tormentas costeras que implican una marejada ciclónica, el aumento del nivel del mar puede exacerbar los impactos de la marejada, por lo que los impactos inmediatos incluyen la inundación de la infraestructura, dejándola inutilizable temporalmente hasta que la inundación retroceda o hasta que se repare o reemplace. El impacto a largo plazo

de las inundaciones de agua salada, puede incluir la corrosión de los soportes estructurales y del equipo eléctrico operativo; consecuentemente, en cualquier tipo de inundación (de agua dulce o salada), la erosión puede destruir las estructuras de soporte naturales y artificiales.

Aparte, los efectos combinados del cambio climático y otros factores de cambio son importantes para la planificación del transporte. Por ejemplo, los cambios demográficos y de uso de la tierra, en combinación con el cambio climático, podrían exacerbar las vulnerabilidades existentes. La pérdida de vegetación a través de la deforestación puede aumentar la susceptibilidad del suelo a la erosión "fomentando" los deslizamientos de tierra y aumentando la sedimentación en los ríos. Además, a medida que aumenta la población, las ciudades pueden seguir creciendo, aumentando las superficies impermeables y ejerciendo mayores presiones sobre el sistema de drenaje existente; lo anterior, combinado con el incremento de los extremos de precipitaciones como resultado del cambio climático, las inundaciones y los deslizamientos de tierra también pueden aumentar en frecuencia y gravedad, exacerbando los impactos en la infraestructura de transporte.

De este modo, la importancia de los impactos relacionados con el clima se incrementará a medida que aumenten los viajes. El grado en que un segmento de la carretera es crítico para los viajes (y para la conectividad del sistema) es un factor vital al considerar la importancia relativa de los impactos climáticos para el sistema de transporte vial general de Colombia. A medida que aumenta la demanda de viajes, también lo hace el impacto de las demoras, los cierres y los accidentes que pueden resultar de los impactos climáticos. Las carreteras que pueden necesitar más adaptación son aquellas en las que existen dos factores de estrés: (1) la carretera sirve a municipios con poblaciones altas (y en crecimiento) y (2) la carretera está ubicada en una región que se proyecta que experimentará un aumento en los eventos de precipitaciones intensas.

Afectación de la infraestructura vial por el clima. Caso práctico: Colombia desde un punto de vista por regiones

Región Andina

Como la región con la mayor población y economía, la Región Andina también alberga la mayor parte del sistema de transporte construido de Colombia. Los peligros de deslizamientos de tierra

e inundaciones asociados con eventos de fuertes precipitaciones ya son comunes en la Región Andina y causan daños al sistema de transporte. Estos eventos ocurren durante todo el año, pero son más comunes en los meses de marzo a mayo, seguidos de diciembre-febrero, septiembre-noviembre y junio-agosto. Las inundaciones y los deslizamientos de tierra causan reparaciones costosas y también alteran el viaje de pasajeros y el movimiento de mercancías.

Por ejemplo, la carretera entre Bogotá y el puerto de Buenaventura experimenta deslizamientos de tierra recurrentes y a menudo no puede operar a plena capacidad. Estas interrupciones, según Consultoría Colombiana (2023) causan daños a la infraestructura y también requieren desvíos extensos, que se estima que causan pérdidas comerciales de USD 5 millones por día. Por lo tanto, las inundaciones provocadas por las intensas lluvias de diciembre de 2023 provocaron el cierre de carreteras y la restricción de vías de circulación en Caldas; así, las perturbaciones en Caldas y otros departamentos han afectado la logística de las industrias colombianas y el movimiento de mercancías en todos los modos de transporte.

En general, se proyecta que la Región Andina experimentará un clima más cálido y húmedo en el futuro, particularmente en el período de marzo a mayo. Esto plantea importantes preocupaciones para el transporte en esta región populosa y económicamente activa. En primer lugar, según la Consultoría Colombiana (2023), la planificación de la construcción y las operaciones de la concesión y las carreteras públicas hasta 2040 deberá tener en cuenta los posibles incrementos en la intensidad y frecuencia de las inundaciones y los deslizamientos de tierra; consecuentemente, se proyecta que las precipitaciones para los escenarios de bajas y altas emisiones probablemente aumentarán en períodos en que las inundaciones y los deslizamientos de tierra ya son muy frecuentes. Además, también se proyecta que la intensidad de los eventos de lluvia más fuertes aumentará entre un uno y un cinco por ciento.

Estos impactos, justifican su consideración en la ubicación, el diseño y las operaciones del transporte por carretera en la Región Andina. Esto también podría interrumpir potencialmente el transporte fluvial en los ríos Magdalena y Cauca si las alturas de los puentes no proporcionan suficiente espacio libre o no están diseñados para soportar una mayor escorrentía; así mismo, la Consultoría Colombiana (2023), la deforestación continua en la Región Andina podría contribuir a una mayor erosión y desestabilización de las laderas, lo que contribuye a los deslizamientos de tierra.

Adicionalmente, si bien los datos indican que la tasa de deforestación se ha desacelerado, en los últimos años se deforestaron según CAF (2018) unas 435.000 hectáreas de tierra. La preservación de los bosques, en particular en las zonas donde se planea construir nuevas carreteras, podría ayudar a reducir el potencial de deslizamientos de tierra y reducir los costos de construcción. Además, restringir el desarrollo humano en estas áreas susceptibles puede reducir los efectos de los deslizamientos de tierra tanto en la población como en los bienes.

Igual, dada la gran población y la importancia económica de la región andina, un examen más detallado de estos impactos en la planificación, el desarrollo y las operaciones de las instalaciones de transporte actuales y futuras, especialmente el sistema vial, debería ser una alta prioridad. A menos que se aborden, IPCC (2021) opina que los impactos del cambio climático hasta 2040 pueden causar graves trastornos en el sistema de transporte, reduciendo la actividad económica y la calidad de vida.

Por lo tanto, los posibles cambios en el desarrollo de la región andina podrían exacerbar y mitigar algunos de los riesgos que plantea el cambio climático. Por ejemplo, el desarrollo no regulado en las laderas de las montañas podría desestabilizar aún más las pendientes y contribuir a los deslizamientos de tierra; igual, el crecimiento demográfico podría seguir generando tensiones en las cuencas hidrográficas y los sistemas de drenaje y aumentar la frecuencia de las inundaciones, al tiempo que colocaría a más personas en zonas propensas a las inundaciones. El desarrollo futuro en zonas susceptibles aumentaría la cantidad de segmentos de carreteras expuestos a estos peligros.

Sin embargo, el desarrollo también podría aliviar algunas de las tensiones que plantean los peligros naturales. Por ejemplo, el desarrollo de nuevas carreteras podría introducir redundancia en el sistema de transporte y permitiría que las mercancías y las personas sigan moviéndose incluso si ciertos componentes del sistema están cerrados.

Región Caribe

La Región Caribe es el segundo centro de transporte más importante de Colombia, después de la Región Andina. Alberga algunos de los puertos marítimos más importantes de Colombia, incluidos los puertos de Cartagena, Barranquilla, Bolívar, Mamonal, Santa Marta y Coveñas, por

lo que las carreteras y los ferrocarriles conectan la región Caribe con el interior del país, lo que facilita el movimiento de mercancías hacia y desde los puertos marítimos.

Sobre este aspecto, la infraestructura de transporte en la región del Caribe es vulnerable a una variedad de peligros naturales, incluidas inundaciones, mareas de tormenta y erosión. Hay algunos casos de deslizamientos de tierra, pero en general éstos no representan un riesgo importante ya que la topografía de la región consiste principalmente en llanuras bajas; en consecuencia, son las inundaciones la preocupación más importante en la región.

Partiendo de lo anterior, en los últimos años hubo muchas inundaciones que causaron daños a la infraestructura vial, ocurridas mayormente entre los meses de septiembre a noviembre, lo que se superpone con los últimos 3 meses de la temporada de lluvias. Además de los factores relacionados con el clima, IDEAM (2022) observa que los riesgos de peligros naturales en la región del Caribe están influenciados por una serie de estresores antropogénicos; de este modo, ha habido un alto crecimiento demográfico a lo largo de la costa de la región en la presente década por lo que el incremento de la población y el crecimiento económico asociado han llevado a la eliminación de amortiguadores naturales contra las inundaciones y la erosión, como los manglares.

Además, el crecimiento poblacional y económico ha puesto a prueba los sistemas de drenaje en las zonas urbanas, lo que ha provocado un aumento de los daños por inundaciones. La mayor parte de la costa caribeña según Hendel et al. (2020), ha experimentado algún grado de erosión. La región del Caribe también ha experimentado cierta deforestación entre 2010 y 2020; sin embargo, esta región no tiene tanta vegetación boscosa como las regiones andina y amazónica y, por lo tanto, puede ser más relevante como factor de estrés localizado.

Al respecto, una revisión de los problemas asociados con los impactos del cambio climático en la región del Caribe muestra lo siguiente: el aumento del nivel del mar, en particular en combinación con las mareas de tormenta y la destrucción de los manglares, puede incrementar el número, la intensidad y el impacto de las inundaciones costeras en las carreteras y puertos de las zonas ya propensas a inundaciones de la región del Caribe. El aumento del nivel del mar variará según la localidad, pero se espera que aumente en promedio a nivel mundial entre 0,5 y 2,0 metros en los próximos años (MADS, 2023).

Así mismo, la CDKN (2020) indica que el 45% de las redes viales de la costa caribeña son altamente vulnerables, el 5% son moderadamente vulnerables y el 23% son ligeramente vulnerables a un aumento del nivel del mar de un metro. Las inundaciones también exacerbarán la erosión costera, especialmente en áreas donde se han eliminado los amortiguadores naturales como los manglares; consecuentemente, los eventos de inundaciones por mareas de tormenta en combinación con el aumento del nivel del mar podrían dar lugar a mayores inundaciones.

De esta forma, se ha demostrado que los puertos, incluidas las conexiones por carretera y ferrocarril para el transporte interior, ya son vulnerables a las inundaciones que, a largo plazo, podrían amenazar la vitalidad económica de las operaciones portuarias y reducir la actividad económica. Se debe realizar un examen minucioso de las carreteras y puertos existentes y planificados para detectar este peligro, por lo que el seguimiento continuo de los niveles del mar, las inundaciones, las condiciones de las carreteras y las operaciones portuarias ayudará a identificar los umbrales críticos en los que puede ser necesaria una intervención.

Igualmente, las temperaturas elevadas provocadas por el cambio climático pueden aumentar los costos de mantenimiento de carreteras y puentes y podrían provocar el fallo de algunos activos. En el corto plazo, los modelos climáticos proyectan que la temperatura aumentará alrededor de 1 °C durante todo el año en la región del Caribe, donde el promedio anual de las temperaturas ya se encuentra entre las más altas de Colombia, con más de 24 °C (Consultoría Colombiana, 2023).

Con el aumento de las temperaturas promedio, se espera que aumente la intensidad de los eventos de calor extremo, así como su número. Si bien la temperatura actualmente no es un peligro identificado para el sistema de transporte en la región, los eventos de calor extremo en el futuro pueden hacer que los materiales de pavimentación se deformen, se expandan y se agrieten, lo que provocaría interrupciones en el servicio.

Además, los materiales de los puentes que no fueron diseñados para soportar períodos prolongados de calor intenso pueden debilitarse o fallar; como resultado, puede ser necesario un mantenimiento adicional de las superficies de las carreteras y los componentes de los puentes.

Puede ser necesario, monitorear el estado del pavimento, así como los costos de mantenimiento, en esta región.

De este modo, los cambios en la incidencia e intensidad de los eventos de inundaciones en el interior de la región del Caribe no están claros y justifican un mayor monitoreo. Históricamente, según la Consultoría Colombiana (2022), las inundaciones han ocurrido principalmente en el período de septiembre a noviembre, cuando se esperaba que las precipitaciones aumentaran, junto con el período de marzo a mayo. Con base en esta información, la región del Caribe podría experimentar más inundaciones en marzo-mayo y potencialmente también en el período de septiembre-noviembre. Sin embargo, se proyecta que el número de eventos de precipitación extrema y la intensidad a corto plazo del peor evento por año disminuirán, lo que podría reducir la susceptibilidad a inundaciones extremas y deslizamientos de tierra en la región; así, parece justificado un mayor monitoreo.

El aumento de la población, combinado con la pérdida de manglares y otras protecciones naturales contra los impactos del cambio climático debido a la presión del desarrollo, podría empeorar la erosión, aumentar las inundaciones y perturbar algunos servicios de transporte. Se prevé que la población del Caribe seguirá aumentando según Consultoría Colombiana (2022) para 2025. Las zonas del norte han experimentado una erosión grave en las últimas décadas, en parte debido a las actividades mineras, y es probable que experimenten un incremento de la erosión debido al aumento del nivel del mar.

Actualmente, sólo hay una carretera principal en estas zonas, pero es posible que se construyan más carreteras para dar cabida al crecimiento de la población, lo que aumentará el número de carreteras vulnerables. Además, si el desarrollo continúa invadiendo los manglares, que se ven cada vez más amenazados por el aumento del nivel del mar, esto puede exacerbar aún más la vulnerabilidad de la costa caribeña a los efectos de la erosión y las inundaciones, por lo que se pueden explorar esfuerzos para reducir estos impactos debido a la población y el desarrollo en esta región.

Región de la Orinoquía

La relativa falta de infraestructura en la región de la Orinoquía ha limitado el desarrollo económico al dificultar el transporte y el comercio de bienes, en particular el ganado y los productos agrícolas. Durante muchos años, la mayoría de las carreteras de esta región no han estado pavimentadas, lo que hace que el transporte por carretera sea casi imposible durante la temporada de lluvias; así, las malas condiciones de las carreteras y la baja densidad vial han hecho que los puertos fluviales y las vías navegables sean la forma principal de transporte.

Los peligros naturales, como las inundaciones fluviales y las sequías, plantean un gran desafío para la región de la Orinoquía. Los principales tipos de desastres naturales experimentados en esta región según CAF (2018) son los incendios forestales, las inundaciones, la erosión y las tormentas de viento. Las inundaciones y las sequías son parte de las estaciones húmedas y secas naturales de la región. En la última década, la infraestructura vial y de puentes de la región se ha visto afectada por muchas inundaciones y por deslizamientos de tierra; por lo tanto, las inundaciones y los deslizamientos de tierra en esta región son más comunes durante junio-agosto y marzo-mayo (la temporada de lluvias), que es cuando ocurre la mayor parte de la destrucción de la infraestructura vial.

En las estribaciones, la expansión de la agricultura ha llevado a la deforestación. La agricultura de roza y quema ocurre de diciembre a febrero es una de las principales causas de los incendios forestales; consecuentemente, la mayoría de los incendios en la región de Los Llanos son causados por la agricultura de roza y quema. Sobre lo anterior, varios factores socioeconómicos e institucionales de acuerdo con CAF (2018) también pueden exacerbar los riesgos de peligros naturales en la región de la Orinoquía. El análisis de las fuentes consultadas indica lo descrito en las siguientes líneas.

En primer lugar, el aumento de los eventos de calor en la Orinoquía podría generar una mayor necesidad de mantenimiento y perturbar las operaciones de las carreteras. Las temperaturas medias anuales en esta zona suelen ser superiores a los 24 °C y pueden llegar a los 30 °C (Cook et al, 2017). Se prevé que las temperaturas medias anuales en la región aumenten tanto en el corto plazo como a mediados de siglo; de este modo, los días muy calurosos pueden incrementar la tensión en las carreteras pavimentadas con asfalto, lo que da lugar a surcos y otros daños en

la superficie. Los días muy calurosos durante la estación seca también podrían incrementar el riesgo de incendios forestales, lo que podría retrasar el tráfico por carretera.

También, un examen detallado de los extremos de calor en esta región, junto con el seguimiento rutinario de las condiciones de las carreteras y los pavimentos, ayudaría a evaluar la necesidad de una intervención directa; así, las interrupciones del transporte por carretera en la región de la Orinoquía podrían empeorar debido al aumento de las inundaciones y los deslizamientos de tierra, lo que interrumpiría el transporte de mercancías de petróleo y oro, así como otros bienes. Se prevé según Nazarnia et al. (2020), que en los próximos años las precipitaciones incrementen durante los meses propensos a inundaciones y deslizamientos de tierra (marzo a agosto), lo que indica una posible intensificación de las inundaciones y los deslizamientos de tierra.

Además, se proyecta que los eventos de lluvias fuertes se volverán más frecuentes, potencialmente aumentando hasta en un 8 por ciento, según UNGRD (2023). Es probable que una temporada de lluvias más severa resulte en un mayor número de cierres de carreteras debido a deslizamientos de tierra e inundaciones; consecuentemente, las fuertes inundaciones pueden arrasar las carreteras sin pavimentar, particularmente si las mismas están ubicadas en un área con mal drenaje.

En este sentido, es posible que sea necesario cerrar las carreteras sin pavimentar después de fuertes lluvias para evitar daños a la superficie de la carretera por el tráfico. Si las aguas de la inundación se infiltran en el sustrato de la carretera, pueden dañar gravemente las superficies de asfalto de las carreteras, por lo que la erosión severa de los puentes debido a las inundaciones fluviales podría requerir reparaciones extensas, cierres de carreteras e incluso reemplazo de puentes.

Ahora, si bien la infraestructura de carreteras y puentes en la Orinoquía es limitada en comparación con la mayoría de las otras regiones, los puentes que existen a través de ríos pueden enfrentar un futuro de mayor escorrentía debido al aumento de las precipitaciones y los eventos de fuertes lluvias.

Región del Pacífico

La región del Pacífico cuenta con algunos de los puertos más importantes de Colombia, entre ellos Buenaventura, Tumaco y Quibdó, de los cuales Buenaventura es el más crítico como puerta de entrada a Asia; sin embargo, los modos de transporte terrestre son escasos en el Pacífico. En general, la región representa de acuerdo con MADS (2023) solo el 4% del total de las carreteras principales del país, el 3% de los ferrocarriles, el 9% de los aeropuertos, el 7% de los puertos y el 3% de los puentes y sin embargo, la carretera principal de la zona, la Troncal Occidente, transporta el 29,7 y el 27,9 por ciento del transporte de pasajeros y mercancías, respectivamente, lo que hace de su buen funcionamiento un objetivo estratégico.

Ahora bien, como región costera con una de las mayores precipitaciones del mundo, la región del Pacífico es vulnerable a una variedad de peligros naturales, incluidos deslizamientos de tierra, inundaciones, aumento del nivel del mar y marejadas ciclónicas. En los últimos años, se registraron importantes deslizamientos de tierra con impactos en el sistema vial en la región, por lo que los deslizamientos de tierra son más comunes de marzo a mayo, seguidos de septiembre a noviembre, diciembre a febrero y junio a agosto. Mientras tanto, se han registrado inundaciones que dañaron la infraestructura vial en los últimos cinco (5) años (ONU, 2015).

De esta manera, según UNGRD (2023) las inundaciones son más comunes de marzo a mayo. Los altos niveles de precipitación anual (6.000-7.000 mm por año) también han limitado las horas de operación en el puerto de Buenaventura; consecuentemente, las condiciones lluviosas han causado retrasos en la descarga de barcos y han afectado la reputación del puerto, lo que ha llevado a pérdidas de negocios.

Por lo tanto, debido a su población y crecimiento económico relativamente menores, la región del Pacífico enfrenta menos presión de los estresores antropogénicos en comparación con otras regiones de Colombia. El crecimiento de la población no ha sido relevante en la mayor parte de la región entre 2010 y 2022, excepto en las áreas alrededor de Buenaventura y Tumaco (Ministerio de Transporte, 2023). Hubo algo de deforestación en los últimos años, pero en general la región sigue siendo densamente boscosa; igual, existe poca o ninguna indicación de erosión a lo largo de la costa del Pacífico.

En este sentido, las inundaciones y los deslizamientos de tierra seguirán alterando las operaciones de las carreteras a menos que se tomen medidas correctivas. Como la región del Pacífico ya tiene una de las mayores precipitaciones del mundo, las lluvias proyectadas incrementan significativamente esas interrupciones. En septiembre-noviembre y marzo-mayo, que son cuando ya se producen la gran mayoría de las inundaciones y deslizamientos de tierra, la precipitación trimestral en el corto plazo podría más que duplicarse en el período de septiembre a noviembre y hasta en un 36 por ciento en marzo-mayo (IDEAM, 2022).

Además, esta tendencia creciente podría verse exacerbada por un aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos de fuertes precipitaciones. El número de eventos de fuertes lluvias por año podría aumentar entre un 4 y un 8 por ciento; así, la intensidad de los peores eventos podría aumentar entre un 1 y un 5 por ciento (IDEAM, 2022).

De este modo, dada la probable importancia estratégica de mantener el servicio en la Troncal Occidente, abordar estos problemas podría ser clave. Al respecto, el aumento del nivel del mar podría representar cada vez más una amenaza para el transporte hacia y desde los puertos importantes y las carreteras de conexión en el Pacífico. Se estima, de acuerdo con Fundación para la Educación Superior y el Desarrollo - FEDESARROLLO (2019), que el nivel del mar aumentará 0,6 metros a lo largo de la costa del Pacífico entre 2050 y 2060 en comparación con el promedio de las últimas décadas. De los 462.457 habitantes estimados en la costa del Pacífico, el IDEAM proyecta que el 41% estaría en riesgo directo de inundaciones debido al aumento del nivel del mar.

Igualmente, las instalaciones portuarias incluidas las conexiones por carretera interiores, deben examinarse de cerca para detectar vulnerabilidades a fin de evaluar mejor la necesidad de adoptar medidas correctivas. Si bien el Pacífico es actualmente una región escasamente habitada, se prevé que la población seguirá creciendo.

Además, a medida que Colombia desarrolle más sus actividades comerciales con los países asiáticos, el Pacífico puede experimentar un auge económico en el futuro con posibles consecuencias para el medio ambiente natural; consecuentemente, si se eliminan los amortiguadores naturales como los manglares, por ejemplo, la región correrá un mayor riesgo de inundaciones costeras y erosión debido al aumento del nivel del mar y las mareas de tormenta.

Región Amazónica

La población de la Amazonia se sustenta con un transporte terrestre muy limitado, lo que hace que los viajes aéreos y fluviales sean más importantes. Las condiciones en la región, que incluyen alta humedad, cuencas fluviales complejas y ecosistemas frágiles, hacen que la construcción de carreteras sea extremadamente difícil. La región contiene solo el 2% de las carreteras principales del país, no tiene ferrocarriles ni puentes, el 11% de sus aeropuertos y el 28% de sus puertos. Estas cifras ponen de relieve la dependencia de esta región del transporte aéreo y fluvial. Aunque esta región tiene cierta susceptibilidad a los deslizamientos de tierra e inundaciones, tiene un número mínimo de eventos de inundaciones y deslizamientos de tierra registrados que han afectado carreteras y puentes (D'Andrea et al., 2005).

En parte, esto se debe a que hay carreteras y puentes limitados en la región. Las inundaciones parecen ser un riesgo mayor para el sistema vial que los deslizamientos de tierra. Los problemas y preocupaciones relacionados con los impactos del cambio climático en el transporte según Burkett et al. (2018) incluyen lo siguiente: los eventos de inundaciones, aunque actualmente tienen impactos limitados en el sistema de transporte por carretera, probablemente aumentarán; así, se registraron pocos eventos de inundación registrados que afectaron carreteras en los últimos (5) años, aunque las precipitaciones durante el período de inundaciones de marzo a mayo podrían aumentar en un 50 por ciento en el corto plazo.

Además, el número de fenómenos meteorológicos extremos podría aumentar más del 10 por ciento y la intensidad de los peores fenómenos podría aumentar entre un 3 y un 5 por ciento. En conjunto, estos cambios en las precipitaciones podrían provocar más inundaciones en las carreteras de la Amazonia Burkett et al. (2018).

En general, se prevé que las precipitaciones estacionales cambien, y que el mayor aumento se produzca entre septiembre y noviembre, después de un período de junio a agosto potencialmente más seco. Esto puede aumentar la probabilidad de inundaciones y deslizamientos de tierra durante esta época del año. También, según el CAF (2018), los impactos de las inundaciones en los 20 puertos y 20 aeropuertos de la región podrían ser significativamente mayores ya que estas instalaciones pueden verse afectadas, en particular, si el sistema de drenaje es inadecuado para soportar fuertes precipitaciones.

De esta manera, los factores de estrés antropogénicos son significativos en la región amazónica, con una tendencia creciente a la deforestación. De 2010 a 2020, según el reporte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2023), la tierra cubierta de bosques se redujo de aproximadamente 41,9 millones de hectáreas (ha) de bosques en la región a aproximadamente 39,8 millones de ha, lo que representa una reducción de alrededor del 5% en un período de 20 años. Las actividades continuas de deforestación podrían afectar la protección natural de la región contra los deslizamientos de tierra; consecuentemente, si la deforestación continúa al ritmo actual, entonces para 2040 puede haber una reducción adicional en la superficie de tierras forestales de aproximadamente 2,9 millones de hectáreas con respecto a las condiciones de 2020 y para 2070 una reducción de aproximadamente 2,8 millones de hectáreas con respecto a esas mismas condiciones.

Así mismo, esta reducción de la vegetación puede reducir la estabilidad a lo largo de las limitadas laderas de la región amazónica, aumentar la erosión y aumentar la escorrentía, aumentando así la amenaza de inundaciones y deslizamientos de tierra, pero la región está en gran parte despoblada en comparación con otras regiones de Colombia, lo que sugiere que el desarrollo humano ha jugado un papel relativamente menor en la contribución al impacto de los deslizamientos de tierra y las inundaciones. Una excepción es la sección noroeste, donde se encuentran los departamentos más poblados.

Afectación de la infraestructura vial por el clima. Caso práctico: Los Páramos

Un caso especial, lo constituye la relación entre cambio climático y servicios de transporte en Los Páramos (figura 3); al respecto, son ecosistemas andinos generalmente fríos y húmedos que se encuentran en áreas entre la línea de árboles (~3.600 metros de altitud) y la línea de congelación (~4.250 metros de altitud). Aproximadamente, el 60% de la vegetación de los páramos es exclusiva de la zona; ésta incluye plantas gigantes en forma de roseta, arbustos y pastos. En conjunto, estas plantas cumplen una función vital como reguladoras del agua para áreas de menor altitud, incluidas las principales áreas metropolitanas de Colombia: el páramo de Chingaza, por ejemplo, proporciona el 80% del agua de Bogotá, de acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2023).

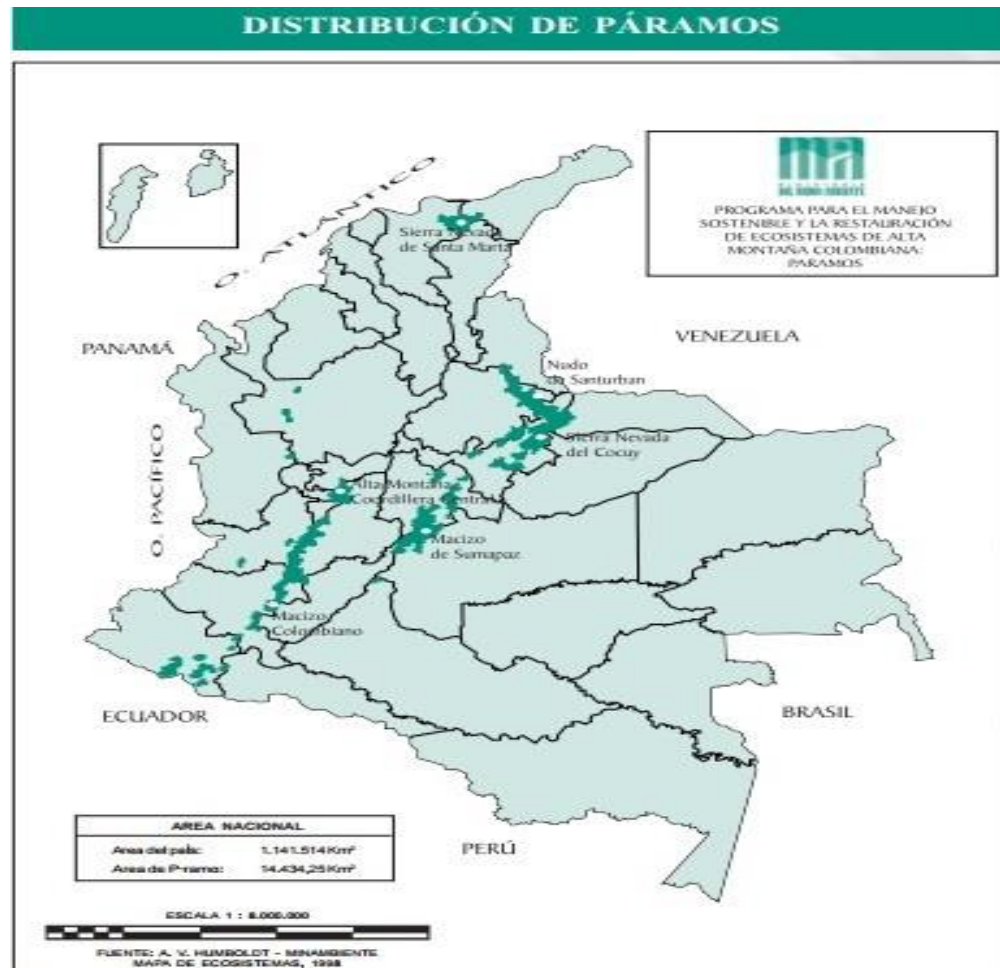
En consecuencia, el gobierno considera que proteger estos frágiles ecosistemas es una necesidad. Según el IDEAM, en los últimos años se han producido diversos impactos relacionados con el cambio climático en los páramos. Según los datos del IDEAM (2024), el análisis del IDEAM de los datos climáticos de estaciones meteorológicas seleccionadas ubicadas en los páramos o cerca de ellos muestra una disminución en los totales anuales de precipitación y un incremento en las temperaturas promedio, lo que explica un aumento observado en el derretimiento de los glaciares. Las temperaturas promedio en estas áreas podrían aumentar entre 2,5°C y 3°C y la precipitación podría reducirse entre un 10% y un 20%.

Como resultado, los expertos esperan que los páramos tengan menos capacidad de almacenamiento de agua. Esto traería nuevos desafíos no solo al ecosistema, sino a ciudades como Bogotá, Cali y Medellín, que dependen de los páramos para sus necesidades de agua. Se necesita más investigación para mejorar la comprensión del ciclo hidrológico y el presupuesto hídrico en estas áreas, incluidos los efectos del retroceso de los glaciares en la hidrología de los páramos y de la variabilidad y el cambio climáticos futuros en el caudal de los ríos (Kubás et al., 2021).

Sin embargo, la reducción de la capacidad de almacenamiento de agua en combinación con eventos de precipitación intensa o un mayor derretimiento de los glaciares podría resultar en aumentos en la escorrentía, lo que resultaría en aumentos potenciales en la erosión y las inundaciones río abajo; consecuentemente, estos riesgos relacionados con el clima para los páramos son preocupantes.

Figura 3

Ubicación de Los Páramos



Nota. Tomado de MADS, 2023.

Afectación de la infraestructura vial por el clima. Caso práctico: Ruta 55

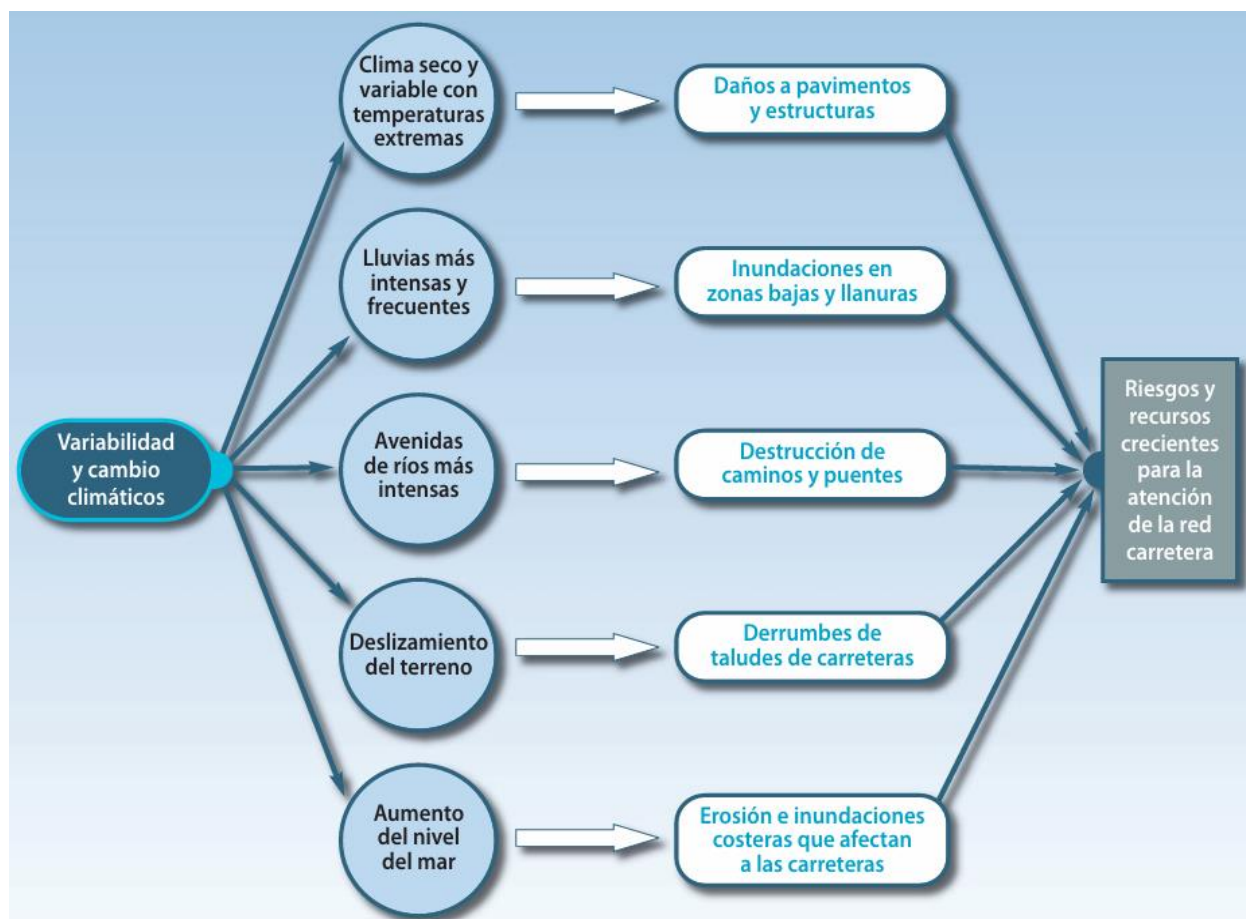
Caso práctico: Región Andina – Ruta 55 – Troncal. Regiones: Bogotá D. C. - La Caro - Tocancipá - Chocontá - Tunja - Duitama - La Palmera - Presidente - Pamplona - Los Patios - Cúcuta - Puerto Santander - Puente Internacional Pedro de Hevia. La Ruta Nacional 55 es una ruta troncal nacional que inicia en Bogotá (específicamente sobre la Carrera Séptima con calle 236) y finaliza en el Puente Internacional Pedro de Hevia sobre el río Guanumito en la frontera con Venezuela. Se conoce como la Troncal Central del Norte según Decreto 1735 de 2001. En la Resolución

3700 de 1995 se establecieron 5 tramos que finalizaban en el sitio La Lejía (municipio de Pamplona), pero la Resolución 5471 de 1999 la amplía hasta el Puente Internacional Pedro de Hevia en el municipio de Puerto Santander. La ruta cuenta con una extensión aproximada de 603.31 kilómetros en su mayor parte pavimentados, excepto por unos 68 km entre los municipios de Chitagá y Cerrito. Permite comunicar la Capital de la República con la región boyacense, los Santanderes y con Venezuela (Bessembinder, 2014).

Como la región con la mayor población y economía en Colombia, la Región Andina también alberga la mayor parte del sistema de transporte construido de Colombia. Tomando como ejemplo la Ruta 55, se consideran en primer lugar los riesgos a los que está expuesta esta vía, siguiendo los lineamientos de la CAF (2018).

Figura 4

Lineamientos relacionados con riesgos red de carreteras



Nota. Tomado de CAF, 2018.

En primer lugar, los peligros de deslizamientos de tierra e inundaciones asociados con eventos de fuertes precipitaciones ya son comunes en la Región Andina y causan daños al sistema de la Ruta 55. Estos eventos ocurren durante todo el año, pero son más comunes en los meses de marzo a mayo, seguidos de diciembre-febrero, septiembre-noviembre y junio-agosto. Las inundaciones y los deslizamientos de tierra causan reparaciones costosas y también alteran el viaje de pasajeros y el movimiento de mercancías (CAF, 2018).

Así, la Ruta 55 experimenta deslizamientos de tierra recurrentes y a menudo no puede operar a plena capacidad. Estas interrupciones causan daños a la infraestructura y también requieren desvíos extensos, que se estima que causan pérdidas comerciales. Igual, las inundaciones provocadas por las intensas lluvias han provocado muchas veces la restricción de vías de circulación en la troncal; así, las perturbaciones han afectado la logística de las industrias de la región andina colombiana y el movimiento de mercancías en todos los modos de transporte.

En general, se proyecta que la Región Andina experimentará un clima más cálido y húmedo en el futuro, particularmente en el período de marzo a mayo. Esto plantea importantes preocupaciones para la Ruta 55, ya que la planificación de la construcción y las operaciones de la concesión y las carreteras públicas hasta 2040 deberá tener en cuenta los posibles aumentos en la intensidad y frecuencia de las inundaciones y los deslizamientos de tierra. Además, se proyecta que las precipitaciones para los escenarios de bajas y altas emisiones probablemente aumentarán en períodos en los que las inundaciones y los deslizamientos de tierra ya son muy frecuentes (CAF, 2018).

Además, también se proyecta que la intensidad de los eventos de lluvia más fuertes aumentará en la región andina entre un uno y un cinco por ciento. Estos impactos, justifican su consideración en la ubicación, el diseño y las operaciones del transporte por carretera en la Ruta 55. Esto también podría interrumpir potencialmente el transporte fluvial en los ríos si las alturas de los puentes no proporcionan suficiente espacio libre o no están diseñados para soportar una mayor escorrentía (CAF, 2018).

De tal forma, la deforestación continua en la Región Andina podría contribuir a una mayor erosión y desestabilización de las laderas, lo que contribuye a los deslizamientos de tierra. Si bien los datos indican que la tasa de deforestación se ha desacelerado, en el período 2015-2020 se

deforestaron unas 435.000 hectáreas de tierra. La preservación de los bosques, en particular en las zonas circundante a la Ruta 55, podría ayudar a reducir el potencial de deslizamientos de tierra y reducir los costos de construcción (IPCC, 2021).

Aparte, restringir el desarrollo humano en estas zonas susceptibles, puede reducir los efectos de los deslizamientos de tierra tanto en la población como en los bienes. Dada la gran población y la importancia económica de la región andina, un examen más detallado de estos impactos en la planificación, el desarrollo y las operaciones de las instalaciones de transporte actuales y futuras, especialmente el sistema vial, debería ser una alta prioridad. A menos que se aborden, los impactos del cambio climático hasta 2040 pueden causar graves trastornos en el sistema de transporte de la Ruta 55, reduciendo la actividad económica y la calidad de vida (IPCC, 2021).

Ahora bien, los posibles cambios en el desarrollo de la región andina podrían exacerbar y mitigar algunos de los riesgos que plantea el cambio climático. Por ejemplo, el desarrollo no regulado en las laderas de las montañas podría desestabilizar aún más las pendientes y contribuir a los deslizamientos de tierra; así, el crecimiento demográfico podría seguir generando tensiones en las cuencas hidrográficas y los sistemas de drenaje y aumentar la frecuencia de las inundaciones, al tiempo que colocaría a más personas en zonas propensas a dichas inundaciones, afectando la Ruta 55.

Así mismo, el desarrollo futuro en zonas susceptibles aumentaría la cantidad de segmentos de la Ruta 55 expuestos a estos peligros. Sin embargo, el desarrollo también podría aliviar algunas de las tensiones que plantean los peligros naturales; por ejemplo, el desarrollo de vías alternas a la carretera podría introducir redundancia en el sistema de transporte y permitiría que las mercancías y las personas sigan moviéndose incluso si ciertos componentes del sistema están cerrados.

De esta manera, las poblaciones pobres y marginadas de la zona circundante a la Ruta 55, probablemente experimentarán los peores impactos del cambio climático debido a su capacidad reducida para abordarlos. Los cambios climáticos en la zona, amenazarán los servicios que brinda la infraestructura, tal como el clima afecta estos servicios hoy. Por ejemplo, las tormentas y las inundaciones hacen muchas veces que la carretera sea intransitable, impidiendo que las personas lleguen a los centros de atención médica o al trabajo. A medida que el cambio climático

empeore, las interrupciones de los servicios se volverán más intensas y frecuentes, y la sociedad en su conjunto sufrirá impactos cada vez más negativos. Las poblaciones andinas corren un riesgo particular por el aumento del nivel del mar, pudiendo ser vulnerables a las inundaciones y la erosión.

Aparte, el cambio climático es una preocupación particular para el cultivo de granos de café, que es una parte esencial de la economía andina. No solo los cambios de temperaturas y precipitaciones en la zona circundante a la Ruta 55 afectarán directamente el cultivo del café, sino que los cambios climáticos también incidirán en la infraestructura de la carretera necesaria para el transporte y la exportación del café. lo que probablemente perjudicará a los trabajadores agrícolas que dependen de este comercio. Dado que los pobres tienen recursos limitados en materia de ahorros, seguridad laboral y opciones de movilidad, se verán afectados desproporcionadamente por las perturbaciones climáticas en el transporte.

De tal manera, las inundaciones y los deslizamientos de tierra, los principales factores de estrés climáticos existentes en la infraestructura de transporte andina en la actualidad, pueden volverse más frecuentes e intensos en las próximas décadas. Estos impactos afectarán particularmente a la zona circundante a la Ruta 55, donde reside mucha población y depende de servicios de transporte críticos para acceder a bienes y servicios. Otros impactos asociados con los factores de estrés climáticos incluyen la inundación de puertos como resultado del aumento del nivel del mar en el Pacífico y el Caribe, así como posibles daños a la carretera estudiada como resultado del aumento de las temperaturas y los fenómenos extremos asociados. Dada la larga vida útil de la mayoría de la infraestructura de transporte, se deben tener en cuenta los riesgos climáticos actuales y futuros al realizar nuevas inversiones en la región andina, porque se espera que los riesgos relacionados con el clima cambien con el tiempo.

Además, dado que el desarrollo de la carretera suele estimular el crecimiento económico y demográfico, pueden surgir nuevas vulnerabilidades que deben tenerse en cuenta en la planificación del transporte. La vulnerabilidad del sistema de transporte a los futuros impulsores del cambio no se limita a los factores de estrés relacionados con el clima; así, otros impulsores del cambio, como el uso y la cobertura del suelo y los cambios demográficos, pueden interactuar para exacerbar o reducir los posibles impactos en el sistema de transporte de la Ruta 55. Por ejemplo, la combinación de deforestación, urbanización y mayor frecuencia e intensidad de las

precipitaciones puede dar lugar a inundaciones más dañinas que afectarán la movilidad y la salud de los bienes y las personas.

Consecuentemente, los impactos del cambio climático en la Ruta 55, requerirán cambios en la forma en que se desarrollan e implementan la planificación, los programas y los proyectos en la región andina de Colombia. Dada la magnitud de las vulnerabilidades existentes y el potencial de impactos adversos cada vez más intensos, el desafío es demasiado grande para ser abordado con acciones incrementales, por lo que queda a la luz los impactos climáticos significativos; así, la creación de un sistema de arreglos institucionales que definan los requerimientos para la generación de información para la toma de decisiones y la gestión de riesgo resulta una prioridad.

Elaborar estrategias relacionadas a medidas de adaptación que consideren los impactos de las amenazas climáticas en la infraestructura del transporte por carretera

Aunque existen considerables incertidumbres implicadas tanto en las proyecciones del cambio climático futuro y los desarrollos socioeconómicos relacionados como en las estimaciones de las consecuencias de estos cambios en los requisitos de transporte, existe una necesidad constante de tomar decisiones y desarrollar el sistema de transporte por carretera, por lo que es recomendable los siguientes lineamientos relacionados a medidas de adaptación que consideren los impactos de las amenazas climáticas en la infraestructura del transporte por carretera, tanto en Latinoamérica como en el resto del mundo.

Dentro de este orden de ideas, las autoridades viales deben evaluar el efecto del cambio climático en la red de carreteras y tomar medidas correctivas en relación con el diseño, la construcción y el mantenimiento de la red de carreteras mediante proyectos que sigan un enfoque integral que tome en cuenta la Gestión de Riesgos para Carreteras en un clima cambiante, para de esa forma proporcionar metodologías y herramientas que permitan información de datos climáticos personalizada y consistente, una buena comunicación entre los investigadores del clima y las autoridades viales, un escaneo preliminar y rápido para estimar los riesgos relacionados con el cambio climático para las carreteras, una evaluación de vulnerabilidad, un análisis de impacto socioeconómico y un plan de acción para la adaptación con aportes específicos de posibles

técnicas de adaptación relacionadas con la geotecnia y el drenaje, los pavimentos y la gestión del tráfico.

Partiendo de lo anterior, las directrices de este objetivo del trabajo están escritas principalmente para que las Autoridades Nacionales de Carreteras de distintos países como Colombia tengan una visión general de los pasos a seguir para una evaluación de riesgos del cambio climático en las carreteras. Sin embargo, dichos lineamientos serán beneficiosos para una amplia gama de profesionales, incluidos los ingenieros de carreteras (geotecnia, hidráulica, pavimentos, gestión del tráfico), administradores de activos, profesionales de la adaptación al cambio climático, gerentes de innovación y gerentes de proyectos; así, aunque las directrices se centran en las carreteras, los temas y la metodología pudiesen ser aplicables también a otros activos de infraestructura como los ferrocarriles o las redes eléctricas.

De esta manera, es importante tener una visión general de cómo las condiciones climáticas pueden amenazar la infraestructura vial y/o los usuarios de la carretera. Ya en muchas publicaciones se presenta una visión general de este tipo (Bles et al., 2010) y (Blieck et al., 2014), pero no se ha encontrado un esquema uniforme en el que se asocien explícitamente todas las posibles amenazas a los parámetros climáticos y se complementen con información adicional sobre la vulnerabilidad y el impacto.

En este sentido, el tiempo varía de un día para otro, de un año para otro y de una década para otra. Para hacer frente a los fenómenos extremos, es necesario conocer el clima actual (promedios y tiempos de retorno de los fenómenos extremos). El clima ya ha cambiado y seguirá cambiando en el futuro, pero no se sabe exactamente en qué medida. Para hacer frente a los fenómenos extremos en el futuro también es necesario conocer esta variación e incertidumbre. En general, se entiende que el clima está cambiando (Blieck et al., 2014).

Igualmente, para estimar los efectos del cambio climático en las carreteras es necesario comparar la lista de posibles amenazas con la vulnerabilidad actual y la posible vulnerabilidad futura cambiante. A partir de la investigación climática se sabe cómo han cambiado los diferentes parámetros en las últimas décadas y cómo podrían cambiar en el futuro.

En relación con las demandas de los supervisores de carreteras; existe una necesidad constante de decisiones y desarrollo de la infraestructura del sistema de transporte por carretera y se entiende que un cambio en las condiciones climáticas puede tener efectos significativos; así, las autoridades viales deben evaluar el efecto del cambio climático en la red vial y tomar medidas correctivas en relación con el diseño, la construcción y el mantenimiento de la red vial ya que la priorización de medidas para maximizar la disponibilidad con costos razonables es una de las tareas más importantes para los gobiernos.

Básicamente, las principales preguntas de los encargados de la infraestructura de carreteras son: ¿El cambio climático está afectando realmente a las carreteras? En general, se acepta que el cambio climático está afectando a la infraestructura vial o al nivel de servicio, de una forma u otra. ¿Cómo y dónde afectará el cambio climático a las carreteras? La pregunta subyacente aquí es sobre la vulnerabilidad a las condiciones climáticas extremas.

De tal manera, para responder dichas preguntas para los administradores de carreteras de los gobiernos es importante saber qué eventos no deseados podrían ocurrir en el futuro debido al cambio climático, pero también hoy en día el clima representa un riesgo para el transporte por carretera. Para saber qué eventos no deseados pueden ocurrir en una red de carreteras, es importante conocer la probabilidad y las consecuencias para obtener una idea del perfil de riesgo.

Ya en las condiciones climáticas actuales, existen grandes incertidumbres que dificultan la estimación de las probabilidades y las consecuencias de los eventos no deseados. Al mirar hacia el futuro, las fluctuaciones incluso aumentarán ya que dichas incertidumbres hacen que un enfoque basado en el riesgo sea un enfoque que valga la pena; así, si se presentan eventos no deseados con un perfil de riesgo inaceptable, es necesario tomar medidas de mitigación ya los operadores de carreteras necesitan una metodología que ayude a priorizar las medidas (Chevreuil & Jeannière, 2014).

Dadas las altas incertidumbres del cambio climático, no existe una respuesta sencilla a las cuestiones del párrafo anterior que pueda ser válida en todas las circunstancias; además, también existen incertidumbres en las cambiantes demandas de infraestructura vial, que tienen su origen en los desarrollos socioeconómicos y en los cambios tecnológicos. En situaciones con altas incertidumbres, se acepta generalmente un enfoque de gestión de riesgos como una forma

de mantener el control sobre la situación o, en relación con esta directriz, sobre la infraestructura vial tanto en Latinoamérica como en el resto del mundo (Chevreuil & Jeannière, 2014).

De este modo, para abordar el cambio climático, las autoridades viales deben basarse en un marco basado en la gestión de riesgos para el apoyo a la toma de decisiones; así, dicho marco debe identificar, analizar, priorizar, evaluar y mitigar los riesgos del cambio climático; así, las razones son que es un marco básico de gestión de riesgos está en línea con la ISO 30001 sobre gestión de riesgos, por lo que es un método que existe de diferentes bloques de construcción que se pueden actualizar o cambiar de manera eficiente en una situación específica.

De esta forma, la estructura de los lineamientos siguientes proporciona los pasos necesarios para realizar una evaluación de riesgos del cambio climático en las carreteras en un clima cambiante; por ello, se visualizan los aspectos básicos que deben tenerse en cuenta en una evaluación de riesgos del cambio climático (ver tabla y figura siguiente).

Tabla 2

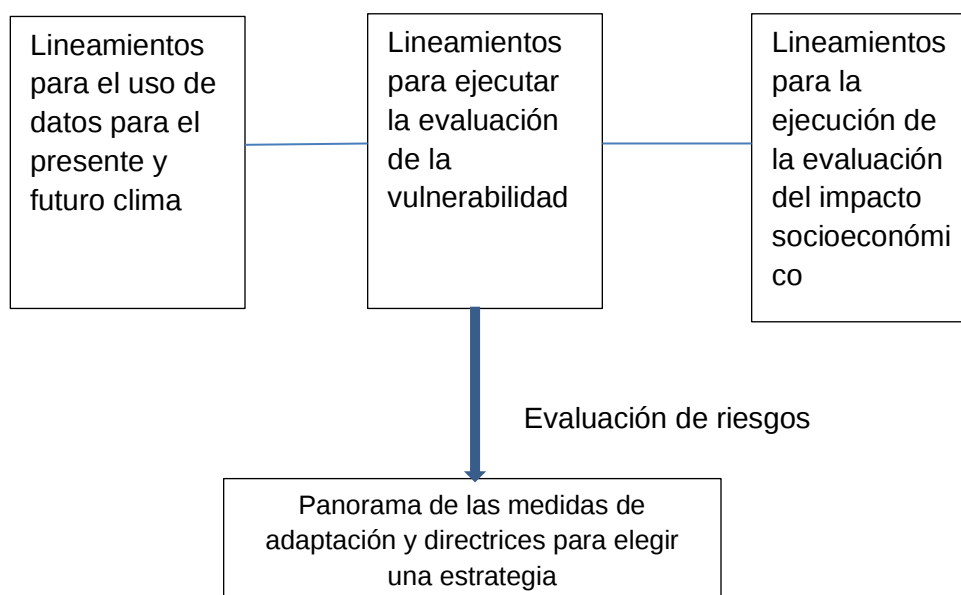
Pasos necesarios para realizar una evaluación de riesgos del cambio climático en las carreteras

1. Análisis del contexto
1.1 Establecer un contexto general
1.2 Establecer un contexto específico para una escala particular de análisis
1.3 Establecer criterios e indicadores de riesgo adaptados a cada escala particular de análisis
2. Identificación de riesgos
2.1 Identificar fuentes de riesgo
2.2 Identificar vulnerabilidades
2.3 Identificar posibles consecuencias
3. Análisis de riesgos
3.1 Establecer cronología y escenarios de riesgo
3.2 Determinar el impacto del riesgo
3.3 Evaluar ocurrencias
3.4 Proporcionar una descripción general del riesgo
4. Evaluación de riesgos

4.1 Priorización de riesgos
4.2 Comparar el riesgo climático con otros tipos de riesgo
4.3 Determinar qué riesgos son aceptables
5. Mitigación de riesgos
5.1 Identificar opciones
5.2 Evaluar opciones
5.3 Negociación con agencias de financiamiento
5.4 Presentar planes de acción
6. Implementación de planes de acción
6.1 Desarrollar un plan de acción en cada nivel de responsabilidad
6.2 Implementar un plan de adaptación
7. Monitorear, replanificar y capitalizar
7.1 Monitoreo y evaluación regulares Revisión
7.2. Replanificación en caso de nuevos datos o retrasos en la implementación
7.3 Aprovechamiento de la experiencia adquirida en eventos climáticos

Figura 5

Esquema de los pasos necesarios para realizar una evaluación de riesgos del cambio climático en las carreteras



Nota. Elaboración propia.

Básicamente, al realizar una evaluación de riesgos, es necesario conocer sobre los eventos no deseados, su probabilidad y consecuencias. En un contexto de cambio climático, la causa de las amenazas (eventos no deseados) se encuentra en el cambio climático, el cual puede ser la causa de nuevas amenazas o un cambio en la frecuencia de ocurrencia o una mayor intensidad de las amenazas a las carreteras.

Para conocer los efectos, es necesario conocer la vulnerabilidad de la carretera o red vial, así, al realizar una evaluación de vulnerabilidad, se obtiene información sobre los lugares de la carretera o red vial que son susceptibles a una determinada amenaza y en qué medida, por lo que la causa y el efecto juntos determinan la probabilidad de una amenaza en un lugar determinado. La determinación exacta de la probabilidad a menudo es difícil de evaluar dadas las altas incertidumbres tanto en los escenarios de cambio climático como en la evaluación de vulnerabilidad (Falemo, et al., 2014).

Al realizar un análisis de impacto socioeconómico, se obtiene información sobre las consecuencias de la amenaza si ocurre en un determinado lugar vulnerable. Todos los ingredientes para un perfil de riesgo se reúnen al conocer la causa, el efecto (que en conjunto proporciona la probabilidad) y las consecuencias, lo que hace posible realizar una evaluación de riesgos. En la evaluación, es importante definir el nivel de riesgo aceptable, sólo es necesario mitigar las amenazas que superan un determinado nivel de riesgo inaceptable; así, mediante la aplicación de medidas de adaptación en el marco de una determinada estrategia de adaptación, el perfil de riesgo de las amenazas disminuirá y debería alcanzar el nivel de riesgo aceptable (Falemo, et al., 2014).

Ahora bien, para conocer y comprender los efectos del cambio climático en la infraestructura del sistema de transporte por carretera, es de suma importancia tener un conocimiento adecuado del clima actual y del cambio climático en sí, lo cual es el campo de trabajo de los climatólogos y deben proporcionar información personalizada a los usuarios finales; así, esto implica hacer interpretaciones y sugerencias para su uso en un entorno de gran variabilidad del clima actual e incertidumbres aún mayores al considerar el clima futuro. Los climatólogos de todo el mundo pueden utilizar diferentes datos, métodos y herramientas para proporcionar esta información a los usuarios finales (Falemo, et al., 2014).

Como consecuencia, las diferentes naciones pueden utilizar diferente información sobre cambio climático, lo que genera discrepancias en los proyectos transfronterizos. En las evaluaciones de riesgo en carreteras cercanas a fronteras o especialmente en evaluaciones que trascienden fronteras, esto dará lugar a resultados incompatibles. Por lo tanto, se deben proporcionar metodologías y herramientas que permitan obtener información de datos climáticos personalizada y consistente, además de la identificación de los riesgos y las amenazas (Ennesser, 2014).

Con relación con los riesgos y amenazas; las amenazas relevantes para la infraestructura vial y parámetros climáticos relacionados ayuda a recopilar datos climáticos relevantes para los estudios sobre la posible vulnerabilidad al cambio climático de la infraestructura vial. Especialmente en el análisis de riesgos, se utilizan datos climáticos para determinar los riesgos en el clima actual y futuro; así, los pasos en el uso de datos climáticos son los siguientes.

Paso 1: Determinar las amenazas y las variables climáticas relacionadas, el período de referencia y el horizonte temporal relevante; Paso 2: Recopilar datos sobre el clima actual y futuro para estas variables climáticas y verificar la calidad y utilidad de los datos; Paso 3: Determinar qué proyecciones/escenarios climáticos utilizar con la ayuda de las sugerencias de las directrices sobre el uso de datos climáticos; Paso 4: Realizar un procesamiento adicional, si es necesario, para obtener los datos con los que se puede realizar el análisis de riesgos; así, los pasos se pueden utilizar tanto para un análisis rápido como para una evaluación de riesgos detallada y las directrices proporcionan recomendaciones sobre cómo realizar los pasos en ambos casos.

Seguidamente, la realización de un análisis rápido de los riesgos debido al cambio climático. Con base en los pasos 1 a 4 descritos en la tabla 2 (análisis de contexto, identificación de riesgos, priorización de riesgos y evaluación de riesgos), se desarrolla un método simplificado para obtener información sobre los puntos vulnerables de los tramos de carreteras transnacionales. La realización del llamado análisis rápido, según Bles et al. (2014) proporciona una primera impresión fundada sobre los riesgos para las carreteras relacionados con el cambio climático, incluido un plan de acción para la adaptación.

De esta forma, de acuerdo con Bles et al. (2014), se deben utilizar todos los datos, conocimientos y experiencias existentes para la red vial estudiada en un enfoque estructurado y explícitamente

basado en el riesgo (QuickScan), el cual comienza cubriendo todas las amenazas posibles y continuamente reduce el enfoque con un proceso continuo. Las partes interesadas se reúnen en sesiones de mesa redonda y se les pide que brinden información sobre las consecuencias y probabilidades; así, esto se está haciendo en un análisis de riesgo semicuantitativo utilizando criterios definidos por las partes interesadas, tanto para la probabilidad como para la consecuencia.

Se recomienda, utilizar los siguientes criterios para puntuar las consecuencias: disponibilidad, seguridad, entorno, costos técnicos directos, reputación y medio ambiente. Solo se identifican las ubicaciones para las amenazas que se evalúan como de alto perfil de riesgo (alta combinación de probabilidad y consecuencia).

Después de la evaluación de riesgos, de acuerdo con Bles et al. (2014), se identifican las amenazas que tienen un nivel de riesgo inaceptable; por lo que para esas amenazas se puede desarrollar un plan de acción para la adaptación. Dado que el análisis rápido utiliza principalmente información cualitativa en entornos de talleres, muchas acciones probablemente se realizarán en el campo de la investigación adicional mediante la realización de análisis de vulnerabilidad detallados o evaluaciones de impacto socioeconómico. También, se puede proporcionar una dirección para el tipo de medidas de adaptación comparando la frecuencia de mantenimiento o la vida útil de la parte amenazada de la carretera con el tiempo esperado en que el cambio climático se vuelva relevante. Al hacerlo, se puede equilibrar la acción de adaptación con el mantenimiento regular.

En cuanto a la realización de una evaluación de vulnerabilidad asistida por SIG para carreteras; (Falemo et al., 2014) indica que se deben describir herramientas existentes eficientes para evaluar vulnerabilidades dentro de las carreteras de la red. Además, sugiere una nueva metodología integral de evaluación de vulnerabilidad; así, los mapas de vulnerabilidad creados en el proceso se pueden combinar con proyecciones detalladas del cambio climático. Usando las herramientas y métodos descritos, los usuarios pueden evaluar la vulnerabilidad a todas las amenazas relacionadas con el cambio climático dentro de la red de carreteras.

Por lo tanto, el enfoque de Falemo et al. (2014) ha sido usar métodos existentes de evaluación de vulnerabilidad detallada asistida por SIG en la medida de lo posible. La vulnerabilidad a

diferentes amenazas se evalúa utilizando diferentes métodos y lo que se proporciona es realmente una guía para identificar y seleccionar el método de evaluación de vulnerabilidad apropiado para la amenaza que necesita ser analizada y una guía para fuentes de datos SIG, sí, la vulnerabilidad se evalúa para cada amenaza en un área geográfica utilizando un método simple de tres pasos que se visualiza a continuación:

Paso 1: Definición de los factores de vulnerabilidad

1.1 – Identificación de los factores de vulnerabilidad relevantes

Paso 2: Recopilación de datos

2.1 – Inventario y recopilación de datos SIG

2.2 – Completar los conjuntos de datos SIG faltantes

Paso 3: Análisis SIG

3.1 – Reclassificación de los datos de entrada en puntuaciones de factores de vulnerabilidad

3.2 – Cálculos ráster

3.3 – Documentación.

Como siguiente directriz, se debe realizar un análisis de impactos socioeconómicos; de acuerdo con (Chevreuil et al., 2014), la evaluación de impacto aborda los eventos de tráfico causados por condiciones climáticas adversas. El indicador de impacto socioeconómico verifica las amenazas que afectarán a la infraestructura (por ejemplo, deterioro del pavimento o deslizamientos de tierra) o directamente a las condiciones del tráfico (por ejemplo, lluvia intensa o nieve) y, por lo tanto, ambos casos reducen el nivel de servicio de la carretera. Para los usuarios de la carretera, el nivel de servicio generalmente se caracteriza por tres criterios principales: seguridad, eficiencia y comodidad.

En relación con la selección de amenazas a evaluar; se basa en los resultados de las directrices. Es la elección de los supervisores de la red de carreteras decidir qué amenazas merecen ser evaluadas. Con base en la evaluación de la vulnerabilidad, se puede decidir qué ubicaciones de interrupción de la carretera deben tenerse en cuenta; además, se evalúan preferiblemente las más frecuentes y/o las que generan el impacto más grave en el tráfico.

Por lo tanto, se pueden considerar combinaciones de amenazas mediante el desarrollo de un enfoque de escenarios, los resultados no son una suma del impacto de eventos individuales, sino una combinación de impactos. Una vez hecha esta elección, es necesario caracterizar las posibles consecuencias sobre el nivel de servicio, a saber: · reducción de la velocidad; tráfico detenido debido, por ejemplo, a restricciones de carril; restricción de acceso con desvío o almacenamiento de vehículos (por ejemplo, vehículos pesados); en este caso, la degradación del nivel de servicio no se debe directamente a los eventos climáticos sobre los activos sino a las medidas que se toman para minimizar el impacto del evento sobre el activo (menores pesos por eje que evitan daños al pavimento).

De los lineamientos anteriores, surge el proceso de modelización; en el caso de una red sencilla y de un evento limitado, se puede realizar una estimación aproximada del tiempo perdido por todos los usuarios de la red y traducirlo en valor monetario. Según la *Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment* (HEATCO, 2020), recomienda utilizar valores armonizados en los diferentes países; en general, las consecuencias de un evento meteorológico importante afectarán a una gran parte de la red. En ese caso, es necesario utilizar un modelo de tráfico, en donde las directrices se presentan como una tipología de modelos de tráfico y se hacen recomendaciones para su uso.

Dependiendo del punto de vista del accionista o del gobierno local, se evaluará el impacto socioeconómico a diferentes niveles. Las directrices proponen tres niveles de análisis; el nivel de red: solo se estima el impacto en el tiempo de viaje de los usuarios de la red vial. El nivel de territorio (territorio irrigado por la red): se estima el impacto en el tiempo de viaje de los diversos enlaces asegurados por la red. Igualmente, un perímetro más amplio del sistema económico en su conjunto y que extiende el análisis no solo en términos geográficos sino también en términos de actividades económicas pueden verse afectadas.

De este modo, corresponde la selección de medidas de adaptación y estrategias de mitigación; las directrices de (IPCC, 2013) indican que se debe presentar una descripción general de las medidas de adaptación y ayuda a seleccionar una estrategia de adaptación. Esta parte de las directrices proporciona apoyo práctico a la mitigación de riesgos.

Esto supone, que se han realizado los pasos anteriores, la evaluación de vulnerabilidad y se conocen las amenazas relevantes del cambio climático, los tipos de activos amenazados y las ubicaciones vulnerables. Esta parte de la directriz trata de las siguientes amenazas del cambio climático: inundación de la superficie de la carretera (suponiendo que no es posible el tráfico), erosión de los terraplenes y cimientos de la carretera, deslizamientos de tierra y avalanchas, pérdida de la integridad de la estructura de la carretera, pérdida de la integridad del pavimento, disminución de la capacidad de conducción debido a fenómenos meteorológicos extremos, reducción de la capacidad de mantenimiento.

Por lo tanto, esta visualización de pasos trata de responder a las necesidades de los gobiernos tanto en Latinoamérica como en el resto del mundo para seleccionar una estrategia de adaptación. Este enfoque proporciona una estructura para la toma de decisiones, ofrece una visión general de las decisiones que se deben tomar en el proceso de adaptación y los factores que influyen en las opciones.

Finalmente, hay que tomar en cuenta la capacitación; la implantación de medidas de adaptación al clima en carreteras, en un contexto de variabilidad y cambio climático, requiere de la participación de personal calificado en varios ámbitos, personal al que deben dirigirse los cursos de capacitación. A saber: asesores políticos que comprendan la realidad climática a la que se enfrenta la Región y su implicación en materia de carreteras; equipos expertos en la evaluación y manejo de modelos adecuados para el desarrollo de previsiones climáticas considerando las características particulares del territorio (FEDESARROLLO, 2019).

Además, los responsables de la red vial son sensibles al reto de la adaptación a la variabilidad y cambio climático; técnicos de las autoridades de carreteras adecuadamente capacitados para liderar el cambio en las infraestructuras viarias de la Región, con experiencia en la evaluación de riesgo climático y la aplicación de medidas de adaptación al clima; equipos institucionales con capacidad para la definición de indicadores de adaptación y la puesta en marcha de las labores de monitoreo de los mismos (FEDESARROLLO, 2019).

Por lo tanto, mientras que en el ámbito político es necesario trabajar en el campo de la sensibilización, en el plano técnico es importante generar programas de capacitación y diseñar unidades específicas en las autoridades de carreteras, con personal adecuadamente formado

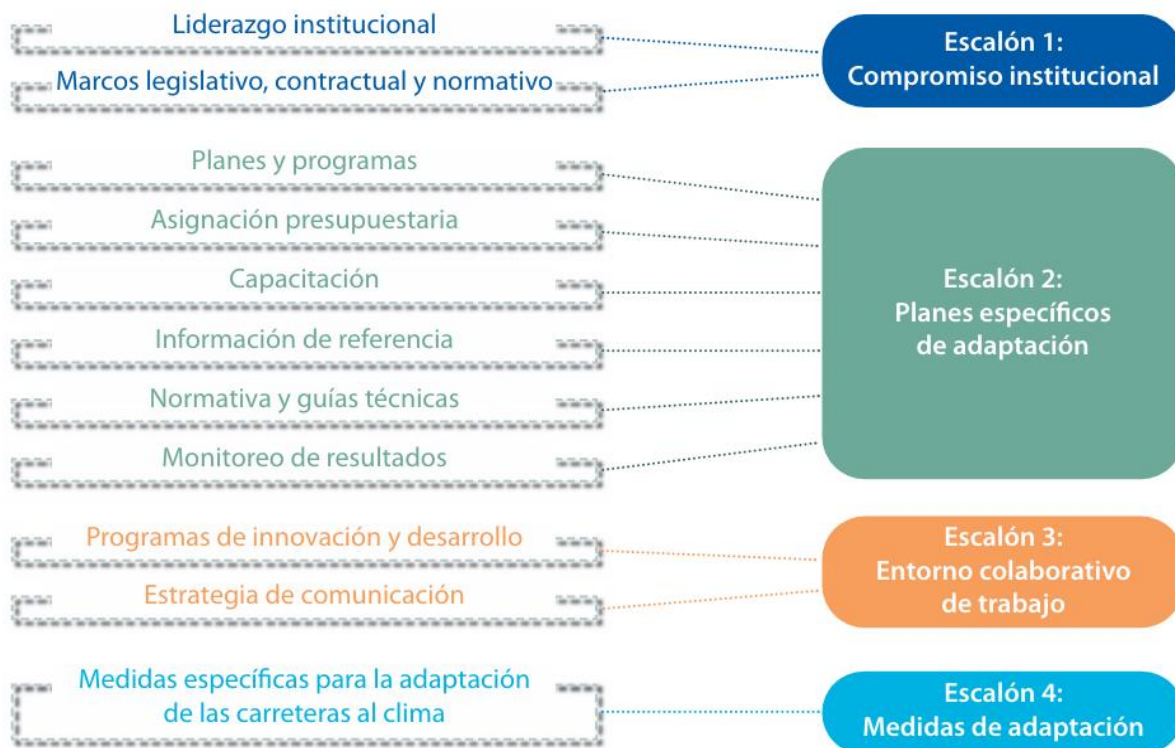
para implantar las políticas de adaptación y realizar un seguimiento de su desempeño (Banco de Desarrollo de América Latina, 2018).

En particular, la capacitación debe centrarse en el uso de las metodologías para el análisis del riesgo, así como en el conocimiento de las medidas de adaptación al clima más utilizadas, especialmente en materia de drenaje, estabilización de taludes, materiales y estructuras, así como en lo que respecta a las acciones de monitoreo. La adecuada capacitación del sector privado es, asimismo, importante, dada su participación en el diseño de proyectos, construcción y explotación de las carreteras, por lo que los ámbitos de formación deberán ser similares a los del sector público (Banco de Desarrollo de América Latina, 2018).

Igualmente, se exponen a continuación las estrategias para enfrentar los riesgos en un caso particular (la Ruta 55, cuyos riesgos se expusieron en el objetivo anterior) tomando como base los lineamientos de la CAF (2018):

Figura 6

Lineamientos CAF



Nota. Tomado de CAF, 2018.

En primer lugar, será necesario que los diferentes organismos involucrados se encarguen de desarrollar capacidades y de encontrar los recursos necesarios para abordar los impactos climáticos. Las principales agencias de transporte colombianas (Ministerio de Transporte, ANI e INVIAS) deben tomar medidas importantes para comenzar a abordar las necesidades institucionales identificadas. Las necesidades de adaptación derivadas del cambio climático probablemente supondrán un desafío para los organismos de transporte y medio ambiente colombianos no sólo en el plano técnico sino también en el institucional, y exigirán nuevos mecanismos de coordinación; así, se enfrentan a la cuestión crítica de cómo abordar los impactos del cambio climático.

Es evidente, que en muchos lugares serán necesarios nuevos acuerdos institucionales y que las capacidades clave pueden no residir en un solo organismo. Se necesitan nuevas necesidades de información y nuevas herramientas para ayudar al Ministerio de Transporte a abordar el cambio climático. Y quizás lo más importante, es que se debe superar la resistencia al cambio. Una lección de la experiencia internacional es que abordar los impactos del clima en el transporte en la Ruta estudiada requerirá un entendimiento mutuo entre los profesionales del transporte y los modeladores climáticos ya que los primeros deben comprender qué información climática está disponible y es pertinente para sus necesidades.

Al mismo tiempo, los modeladores climáticos deben comprender qué necesitan los profesionales y trabajar para desarrollarla en la Ruta 55. Todas las partes deben reconocer los límites de la información en lo que se refiere a la toma de decisiones en materia de transporte; así, se debe abordar una variedad de análisis incluidas proyecciones climáticas y superposiciones de vulnerabilidades a deslizamientos de tierra e inundaciones en la carretera estudiada.

Por otro lado, el análisis específico un proyecto para la Ruta 55 requiere una comprensión detallada de cómo el cambio climático interactuará con el entorno existente y alterará las vulnerabilidades existentes. También, requerirá nuevas herramientas basadas en marcos temporales más largos, probabilidades y gestión de riesgos en lugar de depender de las normas y prácticas existentes, ya que los planificadores de transporte no suelen mirar el futuro cuando desarrollan infraestructura, pero el cambio climático afectará a esos activos durante ese período y debe abordarse para brindar un servicio sólido y resistente a largo plazo; así, muchas de las

mejores prácticas en la planificación del transporte se deben basar en normas de ingeniería desarrolladas a través del análisis de tendencias pasadas.

Sin embargo, el pasado ya no es un buen predictor del futuro a medida que se produce el cambio climático, ya que los modelos pueden ayudar a desarrollar proyecciones climáticas futuras, pero las incertidumbres asociadas con esas condiciones futuras a menudo resultan desafiantes para los tomadores de decisiones en materia de transporte; así, se necesitan nuevos métodos y datos analíticos y requerirán una estrecha colaboración entre los entes involucrados.

En este sentido, para la Ruta 55, se deben identificar medidas de adaptación que aseguren la resiliencia. Además, puede ser necesario fortalecer la capacidad de los organismos inherentes para trabajar con las agencias de transporte a fin de comprender mejor cómo satisfacer sus necesidades, por lo que es necesario preparar y desarrollar otras formas de capacidad para alcanzar este objetivo; así, será necesario abordar las limitaciones de recursos, ya que las medidas de adaptación efectivas en forma de nuevos diseños, materiales más duraderos y sistemas ecológicos requerirán recursos adicionales.

Sin duda, para la Ruta 55, se pueden lograr algunos ahorros de costos adoptando un enfoque estratégico para la adaptación que considere los impactos climáticos y las medidas para abordarlos al planificar y diseñar la infraestructura o la rehabilitación planificada, en lugar de modernizar las instalaciones existentes o abordar los desastres; no obstante, es probable que los costos aumenten para satisfacer las necesidades actuales y futuras y se necesitarán recursos. En Colombia, las necesidades de recursos deben considerarse en el contexto de las carreteras públicas y privadas, por lo que, para las carreteras de propiedad pública, los recursos deben cubrir los costos adicionales si se quiere lograr una mayor resiliencia frente al cambio climático.

Estos costos, podrían trasladarse a los usuarios de la Ruta 55 en forma de mayores peajes o podrían ser asumidos por el gobierno mediante medidas de distribución de riesgos con los concesionarios o subsidios directos a éstos. Si los costos corren por cuenta de los usuarios, se debería prestar una consideración adicional al riesgo adicional de tráfico que podría generar el aumento de los precios que se les aplican y a la posibilidad de que se reduzcan las oportunidades de desarrollo económico.

También, serán necesarios recursos adicionales para la mejora de la coordinación y el desarrollo de la capacidad mencionados anteriormente. Los recursos necesarios podrían ser humanos o financieros. La capacitación y otras formas de desarrollo de la capacidad, podrían abordarse mediante un mayor capital humano o mediante un presupuesto y una financiación adicionales.

De esta forma, las necesidades de adaptación probablemente requerirán nuevas formas de interacción entre los organismos de transporte, medio ambiente y planificación. La necesidad de mejor información y métodos debe acceder a una mayor coordinación entre los profesionales del transporte y los científicos del clima, requerirá capacidad institucional adicional para abordar el cambio climático y planteará inquietudes sobre los recursos y el presupuesto; así, está claro que el Ministerio y los demás organismos de transporte necesitarán coordinarse con otras partes del gobierno colombiano responsables de la planificación y gestión de riesgos para la Ruta 55.

Aparte, se necesitará la cooperación de los grupos de interesados clave que conforman la comunidad de transporte en general, incluidos los concesionarios y los constructores/operadores de la Ruta 55, las instituciones académicas y las asociaciones de transporte, los usuarios clave del sistema de transporte y las comunidades locales. Dentro de este contexto, de políticas más amplias, será necesario identificar medidas de adaptación a nivel de proyecto; así, existen muchas formas diferentes de abordar la adaptación, y la mayoría se enmarca en las siguientes categorías generales, identificadas por el CAF (2018).

En primer lugar, proteger: los activos de transporte en la Ruta 55 pueden protegerse de los impactos del cambio climático mediante características de diseño o estructuras de protección reales. Así mismo, adaptarse: los desafíos relacionados con el clima pueden abordarse adaptando las mayores necesidades de mantenimiento/repación y las interrupciones del servicio. Retirada: en algún momento, los funcionarios de transporte pueden decidir que los riesgos o los costos de los impactos del cambio climático son demasiado grandes y que los activos de transporte deberían trasladarse a otras ubicaciones menos riesgosas.

Por otro lado, deben tomarse en cuenta las barreras financieras; la falta de financiación se cita con frecuencia como una barrera para la implementación de estrategias de adaptación. En la región andina, existen recursos disponibles como el Fondo de Adaptación; de esta manera, un objetivo específico de este fondo es mitigar los riesgos de peligros naturales en el futuro. Igual,

hay que tomar en consideración las barreras técnicas: deben surgir y ponerse en prueba marcos para guiar sistemáticamente a las partes interesadas a través de los procesos de planificación de la adaptación, ya que dichos modelos proporcionan un buen punto de partida para la planificación de la adaptación y se irán mejorando gradualmente con el tiempo.

Así mismo, considerar las barreras políticas; a menos que haya un apoyo adecuado entre el público en general y entre los funcionarios electos, puede resultar difícil movilizar recursos para abordar adecuadamente el cambio climático; por lo tanto, la educación y la divulgación son componentes vitales de las estrategias de adaptación. Finalmente, considerar la incertidumbre en las proyecciones climáticas y los impactos esperados, la cual es inevitable cuando se trata del cambio climático. Afortunadamente, hay formas de actuar ante futuros inciertos y datos imperfectos, incluida la planificación de escenarios, el desarrollo de enfoques estratégicos para la planificación de la adaptación y la identificación de estrategias "sin arrepentimientos" para maximizar la resiliencia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Dada la necesidad de realizar estudios que evalúen los impactos del cambio climático sobre la infraestructura del transporte por carretera, el presente estudio tuvo como objetivo investigar cómo las amenazas climáticas pueden impactar la infraestructura vial, dando especial énfasis a la evaluación de riesgo climático y las medidas de adaptación. Para ello, se realizó una revisión sistemática de la literatura con artículos publicados en importantes revistas y artículos de sitios como Scielo, Dialnet, entre otros y del repositorio de universidades prestigiosas.

También, se debe prestar especial atención a la intensa investigación sobre el tema realizada tanto en Latinoamérica como en el resto del mundo. Se cree que, aunque estudios recientes han demostrado varios posibles impactos en la infraestructura de transporte por carretera, existen muchas lagunas de conocimiento en la literatura internacional, como los estudios que abordan las peculiaridades de los países de clima tropical como Brasil. A nivel nacional, es necesario conocer y mapear las principales amenazas en las regiones urbanas y rurales para identificar, proponer e implementar medidas de adaptación basadas en estudios de viabilidad técnica, económica y social y escala de priorización, considerando la urgencia de poner en práctica las acciones necesarias para adaptar la infraestructura vial.

Por lo tanto, es importante destacar que el costo de la inacción para la adaptación aumentará bajo un clima cambiante. Por lo tanto, este estudio presentó una lista de medidas de adaptación identificadas en la literatura (incluyendo categorías duras y blandas), que pueden considerarse en la planificación de la infraestructura del sistema de transporte por carretera y contribuir en el proceso de toma de decisiones. Por lo tanto, este trabajo es útil para los formuladores de políticas, autoridades y académicos de todo el mundo al evaluar la literatura existente para ampliar el conocimiento de ingenieros, académicos y autoridades sobre el tema.

Para futuros estudios, es importante profundizar en el análisis de las estrategias de acción para la adaptación, sus costos y oportunidades de financiamiento de una adecuada gobernanza e identificar las principales herramientas potenciales que pueden facilitar este proceso. Además, es importante determinar algunos estudios de caso para verificar si algunas de estas estrategias se están implementando y evaluar su efectividad real. Finalmente, también se deben evaluar las

sinergias y los posibles trade-offs entre las estrategias de adaptación y mitigación del cambio climático.

Así mismo, hay que tomar en cuenta la adaptación blanda; al respecto, la concentración de GEI en la atmósfera proveniente de las actividades humanas ha aumentado la frecuencia de los eventos de cambio climático, que degradan la integridad estructural y el desempeño de la infraestructura de transporte, destacando así la necesidad de políticas que motiven a las personas a modificar los hábitos de consumo de energía y adoptar estilos de vida proambientales, por lo que también en este trabajo se hizo un análisis crítico relacionado con la influencia de las actitudes, creencias e intenciones hacia el cambio climático y su apoyo político relacionado.

También, se examinó la percepción entre los profesionales relacionados con las consecuencias del cambio climático en la infraestructura de transporte de carretera y la disposición a adoptar un comportamiento proambiental. Aunque los estudios consultados observaron un nivel relativamente menor de conciencia sobre el cambio climático y sus consecuencias entre el público en general, la percepción de control conductual y la expresión de confianza en la capacidad de llevar a cabo acciones de mitigación entre el público es prometedora.

Así, el sector del transporte es el mayor contribuyente a las emisiones de GEI y representa alrededor del 28% de las emisiones totales de EE. UU. y casi el 30% de las emisiones totales de dióxido de carbono (CO₂) de la Unión Europea, de las cuales casi tres cuartas partes (72%) provienen del transporte por carretera. Los GEI, incluidos el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), los óxidos nitrosos (N_xO) y el ozono (O₃) producidos principalmente por la quema de combustibles fósiles y originados por la actividad humana, atrapan el calor en la atmósfera e inducen fenómenos meteorológicos extremos, como inundaciones, sequías y aumento de las temperaturas medias mundiales, que aceleran el impacto del cambio climático sugirió que la necesidad proyectada de que las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) se estabilizaran en los niveles de 1990 requeriría reducir las emisiones mundiales de CO₂ en más del 60%, el metano en un 15-20% y el óxido nítrico y los clorofluorocarbonos (CFC) en alrededor de un 70-85% (Bles et al., 2010; Blüed et al., 2014).

Con el rápido aumento de la demanda de transporte, considerando que éste depende en gran medida de los combustibles fósiles para funcionar, el efecto resultante de estos gases en términos de patrones climáticos intensos puede tener consecuencias nefastas tanto para los sistemas naturales como para los gestionados. Por lo tanto, los gobiernos y las partes interesadas pertinentes pueden encontrar beneficios a largo plazo en la reducción de las emisiones de GEI mediante políticas y acciones ambientales que consideren el uso de fuentes de energía renovables. Además, la infraestructura de transporte por carretera debe diseñarse, construirse y mantenerse de manera que optimice la operatividad y la resiliencia a fin de combatir el deterioro provocado por el cambio climático y preservar la integridad estructural de estos sistemas.

En resumen, las personas que tienen actitudes favorables hacia la responsabilidad ambiental y poseen una fuerte norma personal de que sus acciones pueden contribuir a aliviar el impacto del cambio climático pueden estar dispuestas a participar en esfuerzos de conservación de energía a pesar de los costos o la incomodidad asociados.

En otras palabras, según los estudios, el público en general ha expresado una mayor confianza en su capacidad para tomar medidas de mitigación destinadas a aliviar el impacto del cambio climático en el sistema de transporte por carretera.

En consecuencia, aunque no alcanzan la significación estadística, es importante reconocer que algunos resultados (la frecuencia de uso del automóvil, la interacción con los medios de comunicación sobre cuestiones relacionadas con el cambio climático y la creencia en los hábitos de caminar y andar en bicicleta para reducir el impacto del cambio climático en los sistemas de transporte) reflejan cierta medida de vacilación por parte de los profesionales en el área a la hora de hacer sacrificios personales para abordar el problema del cambio climático.

Por lo tanto, se enfatiza la necesidad de una responsabilidad colectiva para abordar el tema y la colaboración entre los administradores de transporte, los encargados de la formulación de políticas y el público en general para lograr un esfuerzo de mitigación más eficaz. También, se alienta a los encargados de la toma de decisiones a que incorporen los posibles efectos de las variaciones actuales en la percepción pública a medida que desarrollan estrategias de adaptación durante la planificación y el de la infraestructura de transporte por carretera.

De este modo, en relación con el planteamiento de estrategias relacionadas a medidas de adaptación que consideren los impactos de las amenazas climáticas en la infraestructura del transporte por carretera; las mismas se deben basar en una evaluación de riesgos; así, es necesario conocer sobre los eventos no deseados, su probabilidad y consecuencias. En un contexto de cambio climático, la causa de las amenazas (eventos no deseados) se encuentra en el cambio climático, el cual puede ser la causa de nuevas amenazas o un cambio en la frecuencia de ocurrencia o una mayor intensidad de las amenazas a las carreteras. Para conocer los efectos, es necesario conocer la vulnerabilidad de la carretera o red vial, así, al realizar una evaluación de vulnerabilidad, se obtiene información sobre los lugares de la carretera o red vial que son susceptibles a una determinada amenaza y en qué medida.

Finalmente, el caso práctico relacionado con la afectación de la infraestructura vial por el clima en la región andina, indica que se deben tomar en cuenta diferentes lineamientos relacionados con riesgos en la Ruta 55, así como también distintas estrategias para enfrentar dichas dificultades, considerando tanto planes como programas existentes y la cooperación que debe efectuarse entre los diferentes organismos y talento humano involucrado.

REFERENCIAS

Acuerdo de París (2016). <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>.

Alejandro, S.; Agrawal, A.; Hooper, A.; Boswell, M. (2020). Armonización de la mitigación y adaptación al cambio climático en el transporte y la planificación del uso de la tierra en las ciudades de California; Publicaciones del Mineta Transportation Institute: San José, CA, EE. UU., págs. 1–77.

Banco de Desarrollo de América Latina (2018). Guía de buenas prácticas para la adaptación de las carreteras al clima. Corporación Andina de Fomento.

Bessembinder, J (2014). Directrices sobre el uso de datos sobre el clima actual y futuro para la infraestructura vial, Parte A1 de las directrices ROADAPT, proyecto CEDR.

Bles, T., Y. Ennesser, J.J. Fadeuilhe, S. Falemo, B. Lind, M. Mens, M. Ray y F. Sandersen (2010). Gestión de riesgos en carreteras en un clima cambiante. Guía del método RIMAROCC. Proyecto ERA NET ROAD.

Bles, T., M. Wonin., Informe de análisis rápido del corredor Róterdam-Ruhr (2014). Proyecto CEDR.

Blied, L., M. Chevreuil, L. Foucher, O. Franchomme, E. Jeannière, H. Löfroth, A. Venmans (2014). Selection of adaptation measures and strategies for mitigation, Part E of the ROADAPT guidelines, CEDR project.

Burkett, V., Codignotto, J.O., Forbes, D.L. y Mimura, N. (2018). Zonas costeras y ecosistemas marinos. En: Cambio climático: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de trabajo II al Tercer informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [McCarthy.

J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken y K.S. White (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge.

CAF (2018). Guía de buenas prácticas para la adaptación de las carreteras al clima. Corporación Andina de Fomento.

CDKN (2020). Incorporación de la resiliencia al cambio climático en la planificación de ciudades costeras: primeras lecciones de Cartagena de Indias, Colombia.

Chevreuil, M., E. Jeannière, K. (2014). Socio economic impacts analysis, Part D of the ROADAPT guidelines. CEDR project.

Consultoría Colombiana (2022). Base de datos Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales. Bogotá, Colombia.

- Consultoría Colombiana (2023). Base de datos Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales. Bogotá, Colombia.
- Cook, J.; Lewandowsky, S.; Ecker, U. (2017). Neutralizar la desinformación mediante la inoculación: exponer técnicas de argumentación engañosas reduce su influencia. *PLoS ONE* 12, e0175799.
- Council Directive (2008). On the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection. 2008/114/EC of 8 December 2008 Retrieved from: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/114/oj>.
- D'Andrea, A., Cafiso, S., Condorelli, A. (2005). Methodological considerations for the evaluation of seismic risk on road network. *Pure and Applied Geophysics*. 162(4). pp. 767-782.
- Departamento Nacional de Planificación (2021). Plan Nacional de Adaptación de Colombia. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Colombia-NAP-Spanish.pdf>.
- Diakakis, M.; Boufidis, N.; Grau, J.; Andreadakis, E.; Stamos, I. (2020). Una evaluación sistemática de los efectos de las inundaciones repentinas extremas en la infraestructura y la circulación del transporte: el ejemplo de la inundación de Mandra de 2017. En t. J. Reducción del riesgo de desastres, 47, 1–17.
- Dong, X., Guo, H., & Zeng, S. (2017). Mejora de la resiliencia futura en el sistema de drenaje urbano: infraestructura verde versus infraestructura gris. . *Eco*, 280–289.
- Ennesser Y. (2014). Quicksan report : A24 motorway in Portugal. CEDR project
- Falemo, S., L. Blied, P. Danielsson. (2014). Evaluación de la vulnerabilidad de las carreteras asistida por SIG: métodos existentes y nuevas sugerencias, Parte C de las directrices ROADAPT, proyecto CEDR.
- Fundación para la Educación Superior y el Desarrollo - FEDESARROLLO (2019). Proyectos de infraestructura del cambio climático. Fondo de Adaptación.
- Gilmore, A.; St Clair, T.(2018). Presupuestación para el cambio climático: obstáculos y oportunidades a nivel estatal de EE. UU. *Subir. Política*. 18 , 729–741.
- Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (HEATCO, 2020). Directrices tipología de modelos de tráfico.
- Hendel, M.; Bobée, C.; Karam, G.; Parison, S.; Berthe, A.; Bordin, P. (2020). Developing a GIS Tool for Emergency Urban Cooling in Case of Heat-Waves. *Urban Clim*. 33, 100646.
- ICF (2023). Preocupaciones críticas del cambio climático para el sector vial en Colombia: Documento de apoyo técnico. Washington, DC.

- IDEAM (2022). Conjunto de datos de estaciones climáticas del IDEAM. Bogotá, Colombia.
- IDEAM (2023). Conjunto de datos de estaciones climáticas del IDEAM. Bogotá, Colombia.
- IDEAM (2024). Conjunto de datos de estaciones climáticas del IDEAM. Bogotá, Colombia.
- IPCC (2021). *Cambio climático 2021: la base de la ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación*. Río de Janeiro: Ecoe.
- IPCC (2022). Cambio Climático 2022: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, RK Pachauri y LA Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 151 págs. URL: https://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/resources/pdf/IPCC_SynthesisReport.pdf.
- IPCC (2013). Cambio climático. Bases científicas físicas, contribución del Grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Cambridge University Press.
- Kubás, J., Hollá, K., Štofková, K., R., Ballay, M., Polorecká, M. (2021). Strategy management of telematics systems in the transport sector with regard to safety. In: Transportation Research Procedia, Vol. 55. pp. 1498-1505. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.07.138.
- Larsen, P.; Goldsmith, S.; Smith, O.; Wilson, M.; Strzepek, K.; Chinowsky, P.; Saylor, B. (2008). Estimación de los costos futuros de la infraestructura pública de Alaska en riesgo por el cambio climático. Glob. Environ. Chang. 18 , 442–457.
- Liao, T.; Kumar, I.; Dojutrek, M.; Labi, S. (2018). Actualización de los atributos climáticos secundarios para la gestión de la infraestructura de transporte. J. Infraestructura. Sistema, 24 , 1–12.
- Mallick, R., Radzicki, M., Daniel, J., & Jacob, S. (2014). *Use of System Dynamics to Understand Long-Term Impact of Climate*. Boston : Rev sys.
- Melvin, A.M.; Larsen, P.; Boehlert, B.; Neumann, J.E.; Chinowsky, P.; Espinet, X.; Martinich, J.; Baumann, M.S.; Rennels, L.; Bothner, A.; et al. (2017). Climate Change Damages to Alaska Public Infrastructure and the Economics of Proactive Adaptation. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 114, E122–E131.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2023). Sistema Nacional de Cambio Climático. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Transporte (2023). Infraestructura para el Cambio Climático: El Sector Transporte (Infraestructura para el Cambio Climático: Sector Transporte)
- Moretti, L.; Loprencipe, G. (2018). Cambio climático e infraestructuras de transporte: estado del arte. Sostenibilidad.10, 4098.

- Nazarnia, H.; Nazarnia, M.; Sarmasti, H.; Wills, W.O. A. (2020). Systematic Review of Civil and Environmental Infrastructures for Coastal Adaptation to Sea Level Rise. *Civ. Eng. J.* 2020, 6, 1375–1399
- Olugbem, M. (2021). *Impacto del cambio climático en la infraestructura de transporte: comparación de las diferencias de percepción entre el público de EE. UU. y los profesionales del Departamento de Transporte*. Obtenido de DOT: <https://doi.org/10.3390/su132111927>.
- ONU (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Obtenido de https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_.
- ONU (CMNUCC, 2004). Convención de las Naciones Unidas en el marco sobre el Cambio Climático. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas.html#:~:text=Fue%20adoptada%20en%20mayo%20de,21%20de%20marzo%20de%201994>.
- Pérez, N., & Monsalve, D. (2021). *Impacto del plan nacional de adaptación del cambio climático para las obras de infraestructura vial de cuarta generación en Colombia. Caso de estudio: proyecto Honda-Puerto Salgar-Girardot. [Trabajo de grado]*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Civil.
- Pérez-Morales, A.; Gomariz-Castillo, F.; Pardo-Zaragoza, P. (2019). Vulnerability of Transport Networks to Multi-Scenario Flooding and Optimum Location of Emergency Management Centers. *Water*, 11, 1197.
- Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC, 2021). Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP) del PMIC. URL: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>.
- Pugno, M., & Sarracino, F. (2021). *Motivación intrínseca versus extrínseca para proteger el medio ambiente del cambio climático: y evidencia correlacional y causal*. . Munich: Universidad de Cassino, Institut National de la Statistique et des Estudios económicos d.
- Qualtrics Seattle (2021). Washington, EE. UU. 2021. Disponible en línea: <https://www.qualtrics.com>
- Santos, A.S.; de Abreu, V.H.S.; de Assis, T.F.; Ribeiro, S.K.; Ribeiro, G.M. (2021). An Overview on Costs of Shifting to Sustainable Road Transport: A Challenge for Cities Worldwide. In *Carbon Footprint Case Studies. Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes*; Springer: Singapore, pp. 93–121.

- Sventeková, E., Ballay, M., Prievozník, P. (2020). System approach to assessing the criticality of key elements in road transport. In: Transport means 2020: Proceedings of the 24th international scientific conference. Kauno Technologijos Universitetas, Kaunas, pp. 702-706.
- Tolpanen, S., & Kang, J. (2020). El efecto de los valores sobre la huella de carbono y las actitudes hacia el comportamiento proambiental. . *J. Limpio. Pinchar.*, 282, 1–10.
- UNGRD (2023). Conjunto de datos del análisis de impacto múltiple de la Agencia Nacional de Gestión de Riesgos en Desastres
- Wang, J.; Kim, S. (2018). Análisis del impacto de los valores y la percepción sobre el escepticismo sobre el cambio climático y sus implicaciones para las políticas públicas. *Clima* 2018 , 6 , 99.
- Zimmerman, R. (2019). Cambio climático global e infraestructura de transporte: lecciones del área de Nueva York. *Clima del panel de la ciudad de Nueva York*. Chang, 11 , 1–11.