UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERIA CIVIL

Estudio de buenas prácticas para la adaptación de carreteras al cambio climático

Tesis presentada para cumplir con los requisitos finales para la obtención del título de Ingeniería Civil.

Autores:

Adriana Isabel Romero Murillo

Director:

Juan Pablo Londoño Linares

Bogotá D.C. – Colombia.

2024

Dedicatoria:

A mis padres por su apoyo incondicional, por creer en mi en los días más difíciles

A mi hermano por la fuerza y valentía que me inculcó, y la importancia de la constancia

A las dos pequeñas almas que me acompañaron todo este proceso

y todos aquellos que me impulsaron a seguir.

AGRADECIMIENTOS:

Quiero agradecer al Ing. Juan Pablo Londoño por su apoyo y guía constante durante este proceso, por brindarme su apoyo y su confianza con esta oportunidad desde el inicio. Su dirección y asesoría fueron fundamentales para que esta investigación se desarrollara, para que no me rindiera y mejorar continuamente.

A mi familia por siempre darme el animo necesario, su apoyo constante, y los consejos que me ofrecieron constantemente, instándome siempre a creer mas en mi misma y dar lo mejor de mí.

A todos los profesores y la Universidad de la Salle por las lecciones aprendidas y las experiencias compartidas, que componen el profesional y ser humano que soy.

A los compañeros y amigos que hice en este camino y que me acompañaron en momentos cruciales brindándome su apoyo y ánimo, e inspirándome a seguir adelante.

RESUMEN:

La presente investigación documental busca ofrecer ayuda a agencias de transporte, gobierno y el público en general involucrados en la toma de decisiones desde la planeación, desarrollo, puesta en marcha, mantenimientos y rehabilitación de activos en la infraestructura carretera a conducir para generar opciones de adaptación y resiliencia ante eventos climáticos extremos e hidrometeorológicos relacionados con el cambio climático.

La revisión busca ofrecer información y conocimientos sobre el cambio climático y fenómenos meteorológico que afectan el sistema carretero y como se comportara al clima futuro, y permita a los interesados desarrollar una infraestructura resiliente que resguarde la vida de los usuarios y las inversiones centradas en la mejora de vías, mantenimiento y construcción que promueven el desarrollo, la competitividad y la economía. Apoyada de una investigación bibliográfica que revisará prácticas internacionales el marco describirá los pasos para conducir y desarrollar las evaluaciones, comprender la vulnerabilidad, sus indicadores, factores climáticos que inciden y los activos que componen el sistema carretero (vida útil, estado, localización) haciendo énfasis en los efectos negativos en aumento que lleven al deterioro y disminución de vida útil de la infraestructura.

Palabras clave: Adaptación, vías, resiliencia, cambio climático, riesgo.

ABSTRACT:

This documentary research aims to provide support to transportation agencies, governments, and the general public involved in decision-making processes related to planning, development, implementation, maintenance, and rehabilitation of assets in road infrastructure. The goal is to generate options for adaptation and resilience in response to extreme climate and hydrometeorological events associated with climate change.

The review seeks to offer information and insights on climate change and meteorological phenomena that affect the road system, and how it will behave in the future climate. It will enable stakeholders to develop resilient infrastructure that protects the lives of users and investments focused on improving roads, maintenance, and construction that promote development, competitiveness, and the economy. Supported by a bibliographic review of international practices, the framework will outline the steps to carry out and develop assessments, understand vulnerability, its indicators, the climatic factors influencing it, and the assets that make up the road system (useful life, condition, location), with an emphasis on the increasing negative effects that lead to deterioration and reduced lifespan of the infrastructure.

Keywords: Adaptation, roads, resilience, climate change, risk.

TABLA DE CONTENIDO:

1. INTRODUCCIÓN: 8

2. OBJETIVOS: 9
2.1. Objetivo general: 9
2.2. Objetivos Específicos: 9
3. MARCO TEORICO 10
4. MARCO CONCEPTUAL: 12
5. MARCO LEGAL: 14
6. ESTADO DEL ARTE: 17
7. PROBLEMÁTICA: 18
8. ENFOQUE DEL ESTUDIO: 20
9. METODOLOGÍA: 20
9.1. CAPITULO 1: FACTORES CLIMATICOS QUE IMPACTAN LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA COLOMBIANA: 21
9.1.1. CLIMA PROYECTADO E HISTORICO: 21
9.1.2. Variables climáticas que mayor impacto tienen sobre la infraestructura: 27
9.2. CAPITULO 2: TIPOS DE ACTIVOS TIPICOS DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL Y SUS CARACTERISTICAS: 43
9.2.1. Puentes y pontones: 43
9.2.2. Obras de drenaje: 45
9.2.3. Estructura de rodamiento: 50
9.2.4. Estructuras de Contención: 54
9.3. CAPITULO 3: RELACION ENTRE FACTORES CLIMATICOS Y INFRAESTRUCTURA CARRETERA: 57
9.4. CAPITULO 4: PILOTOS DE ADAPTACIÓN: 82
9.4.1. Pilotos de adaptación Nacionales: 82
9.4.2. Pilotos de adaptación Internacionales: 85
10. CONCLUSIONES: 99
11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS: 103

Índice de Figuras:

Figura 1. los cuatro caminos de forzamiento radiativo seleccionados por el IPCC para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones en el planeta a 2011.....24
Figura 2. Evolución de la temperatura media para los periodos 2011 - 2040, 2041 – 2070 y 2071 -2100 con respecto a la temperatura media de 1976 - 2005. 25
Figura 3. Evolución de la precipitación media para los periodos 2011 - 2040, 2041 – 2070 y 2071 -2100 con respecto a la precipitación media de 1976 - 2005. 26
Figura 4. Resumen de Daños por tipo de Infraestructura tras el fenómeno de la Niña 2020-2023.....27
Figura 5. Número de Eventos de Inundación registrados en los 10 departamentos más afectados en los meses aparición de La Niña periodo 1950 - 2023. 31
Figura 6. Mapa de susceptibilidad para eventos de Inundación. 32
Figura 7. Posicionamiento Emergencia vial Ruta 45A San Gil -Onzaga.....33
Figura 8. Número de Eventos de movimientos en masa registrados en los 10 departamentos más afectados en los meses con Aparición de La Niña periodo 1950 - 2023. 33
Figura 9. Pronostico por deslizamiento de tierra por regiones; Boletín 0549. 34
Figura 10. Posicionamiento Emergencia Vía Belén - Sácama (abril, 2023).....35
Figura 11. Número de Eventos de Avenidas torrenciales registrados en los 10 departamentos más afectados en los meses con aparición de La Niña periodo 1950 - 2023.....36
Figura 12. Mapa de susceptibilidad para eventos de Flujo/Avenidas Torrenciales. 37
Figura 13. Posicionamiento Emergencia Bucarasica - Sardinata (noviembre, 2024).....38
Figura 14. Número de Eventos de Sequías registrados en los 10 departamentos más afectados en los meses con aparición del Niño periodo 1914 - 2021. 40
Figura 15. Mapa de susceptibilidad a eventos de Sequías por la aparición de fenómeno del Niño 41
Figura 16. Estructura de puente o pontón.....43
Figura 17. Canal de Rápidas lisas. 45
Figura 18. Canal de rápidas y escalonadas......45
Figura 19. Canales de rápidas con tapa y columpio. 45
Figura 20. Estructura de disipación rápidas con pantalla deflectora. 46
Figura 21. Estructura de disipación Vertedero. 46
Figura 22. Pozo de Amortiguación......46
Figura 23. (1) Sección transversal de Cuneta con bordillo de seguridad; (2) secciones típicas de cuneta usadas en obras de drenaje, Colombia.....47
Figura 24. Detalle de sección Berma-Cuneta-Filtro en Talud de Lleno, (IZQ) y en Talud de Corte (DER). 47
Figura 25. Sección transversal de zanja de coronación. 48
Figura 26.Bajantes o alivios sobre talud. 48
Figura 27. (1) Sección transversal de caja colectora; (2) Unión cuneta y caja colectora o poceta. 48
Figura 28. (1) Sección transversal de terminal de una alcantarilla Fuente: INVIAS, 2009. 49
Figura 29. Imagen de construcción de terminal de alcantarilla. Fuente: Periódico la voz de la región, https://lavozdelaregion.co/millonaria-inversion-para-ejecutar-obras-viales-en-veredas-de-altamira/, 2022. 49
Figura 30. (1) vista de frente de Box Culvert sección cuadrada (2) Vista en planta de Box Culvert. 50
Figura 31. Estructura típica de un pavimento asfaltico (Flexible).....51
Figura 32. Estructura típica de un pavimento rígido (Concreto). 52
Figura 33.Sección en planta y transversal de un pavimento placa huella. 53
Figura 34.Corte transversal de pavimento articulado. 54
Figura 35.Muro de gravedad en roca.....55

Figura 36. Gaviones Tipo caja. 55
Figura 37. Gaviones tipo Colchón. 55
Figura 38. Muro de concreto sin refuerzo. 56
Figura 39. Muro de contención en Fuente: INVIAS, 2006 56
Figura 40. Muro de contención en T invertida. Fuente: INVIAS, 2006. 56
Figura 41. Muro de contención en T con llave. Fuente: INVIAS, 2006 56
Figura 42. Muro de contención con Contrafuertes (1) Trasdós (2) Intradós. Fuente: H. Gómez, 2013 57
Figura 43. Muro de contención con Contrafuertes (1) Triangular (2) En L Fuente: H. Gómez, 2013. 57
Figura 44.Muro de contención contrafuerte y estribo. Fuente: INVIAS, 2006. 57
Figura 45. Interconexion vía Yati - La Bodega 83
Figura 46. Vista aérea de la Interconexión Yatí - La Bodega 83
Figura 47. Ubicación del estudio Box Coulvert (5648). 89
Figura 48. Vista en planta de la alcantarilla 5648 que muestra los contornos de elevación. 90
Figura 49. Fotografía de la alcantarilla 5648, lado aguas abajo. 90
Figura 50.Fotografía de la alcantarilla 5648, lado aguas arriba. 90
Figura 51. Ubicación del estudio Box Coulvert (5722). 91

Índice de Tablas:

Tabla 1. Eventos de Remoción en masa en carreteras registrados por el INVIAS, 2023. 35

Tabla 2. Componentes estructurales de un puente o pontón. 43
Tabla 3. Componentes estructurales de un Box Culvert. 50
Tabla 4. Componentes estructurales un pavimento flexible. 51
Tabla 5. Componentes estructurales un pavimento Rígido. 52
Tabla 6. Componentes estructurales un pavimento articulado. 54
Tabla 7. Matriz de caracterización de eventos y sub-eventos amenazantes del Cambio climático. 58
Tabla 8. Matriz de impactos por Amenazas Naturales. 62
Tabla 9. Opciones de Adaptación, Caso de estudio Canyon Cove Lane. 87
Tabla 10. Opciones de Adaptación, Caso de estudio Distrito 1. 91
Tabla 11. Opciones de Adaptación, Caso de estudio Distrito 2. 92
Tabla 12. Opciones de Adaptación, Caso de estudio Falcon Cove. 93
Tabla 13. Opciones de Adaptación, Caso de estudio Pantano de Gallagher 94
Tabla 14. Opciones de Adaptación, Caso de estudio Cuencas del Rio Skunk y el rio Cedar, ...95
Tabla 15. Soluciones para casos de estudio. 95

1. INTRODUCCIÓN:

El Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) advierte que el clima cambia, las temperaturas aumentan y esto trae consigo diferentes dinámicas climáticas que se expresan en climas más intensos en diferentes regiones del mundo. En el caso de Colombia, que expresa una alta vulnerabilidad debido tanto a eventos climáticos como a la situación económica y social del país, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) presentó entre el 2009 y el 2010 sus primeras dos comunicaciones sobre el cambio climático, sin embargo, es la tercera en donde desarrollan los modelos climáticos más acordes para la comprensión de los escenarios de emisiones que proyectan el comportamiento de los cambios de temperatura, precipitaciones y aumento del nivel del mar.

El informe presenta cambios significativos que implican una amenaza potencial a sistemas de vida humana, ecosistemas, infraestructura entre otros ámbitos importantes para el país. Además, no debe olvidarse que el Cambio Climático es solo uno de los factores de cambio importantes a los factores climáticos, la variabilidad Climática (compuesta por los ciclos ENOS- El Niño y La Niña) implican un riesgo para el territorio, donde se ven intensificados los factores climáticos propios de la región, generando perdidas y daños a la nación, los Eventos de la Niña 2010 – 2011 y 2021-2023 ofrecen una panorámica del escenario climático generando por un fenómeno climático.

La infraestructura carretera es una de las más expuestas a dichos fenómenos derivados de factores climáticos que generan daños a los activos, repercuten en la eficiencia y alteran las operaciones de servicio y calidad de vida de las comunidades que comunican, generando traumatismos en su vida cotidiana e incluso la perdida de vida. Sobre la información de pérdidas por fenómenos climáticos Colombia posee información desagregada bastante útil, frente al desarrollo de políticas en acción al Cambio climático, este es uno de los países más adelantados y posee investigación al respecto, e incluso un estudio de riesgo para el cambio climático que fue publicado en el 2015, pero no cuenta con actualizaciones hasta el momento.

El desarrollo del presente documento tiene como objetivo realizar una revisión documental a información e investigación sobre factores climáticos, que nos permitan realizar una visión general del país en cuanto temperaturas, precipitaciones y aumento del nivel del mar, tanto actualmente como en el futuro basándonos en la Comunicación sobre el Cambio Climático que el IDEAM presentó en el 2015; Además de realizar la revisión sobre la infraestructura típica Colombiana, que nos permita identificar el impacto que tienen estos fenómenos en la misma de manera que permita entender la importancia de encontrar opciones de Adaptación en nuestras carreteras a nivel nacional, desde la revisión de estudios de mitigación y resiliencia llevados a cabo por otros países.

2. OBJETIVOS:

2.1. Objetivo general:

Revisar buenas prácticas de Adaptación de la infraestructura al cambio climático, generado un documento que brinde opciones de adaptación más relevantes y aplicables al contexto colombiano, frente a los factores relacionados con la variabilidad y cambio climático que impactan toda la infraestructura vial para que pueda ser integrados a planes de emergencia, ordenamiento territorial y procesos constructivos.

2.2. Objetivos Específicos:

- Identificar los factores climáticos existentes que afectan la infraestructura vial y los impactos sobre la misma.
- Identificar infraestructura vial propia del país y caracterizarla reconociendo los impactos que pueden sufrir debido a fenómenos derivados del cambio climático, seleccionando los más crítico o relevantes.
- Identificar buenas prácticas tanto a nivel internacional como nacional, permitiendo realizar un análisis de sus oportunidades y resultados obtenidos que garanticen una infraestructura resiliente, y que puedan adaptarse al contexto colombiano.

3. MARCO TEORICO:

La infraestructura vial es uno de los factores más importantes para el desarrollo económico y social de cualquier nación, su desarrollo es capaz de impulsar la economía de las regiones, el acceso a la salud, educación, empleo y alimentación. Por lo que impulsar líneas de vida y comercio a todas las regiones de un país es fundamental para su crecimiento y competitividad, tanto para las grandes ciudades como para las zonas rurales, y su efecto positivo estará dado también por la calidad y el buen estado de los activos que componen el sistema carretero durante su vida útil (Ramírez y De Aguas, 2019).

Colombia posee 205.745 km compuestos de vías primarias, secundarias y terciarias; las vías primarias las que se encargan de conectar las principales ciudades, puertos y fronteras, administradas por la ANI (Agencia nacional de Infraestructura) y el INVIAS (Instituto nacional de vías) y son 18.323 Km. Las secundarias suelen conectar municipios y/o departamentos, son aproximadamente 45.137km a cargo del INVIAS y gobiernos departamentales, mientras que la red terciaria es la más extensa, con un aproximado 143.000 km (información no exacta teniendo en cuenta que no se han contabilizado algunos caminos vecinales, vías privadas y su ubicación remota) y su gestión principalmente por los municipios generando una limitación en cuanto a información, seguimiento y mantenimiento (J. Agudelo, 2022).

Colombia trabaja en el desarrollo y mantenimiento de la red férrea, orientada en un gran porcentaje al transporte de materias primas, minerales y carga contenerizada y se compone de 3.553 km de longitud desarticulados a cargo de la ANI y privados, regulada por el sistema de concesiones de líneas ferroviarias. Igualmente, cómo un país que cuenta con un espacio marítimo posee su red de infraestructura portuaria, como principal modo de transporte para movimientos de mercancías al exterior, además del sistema aeroportuario; y una pequeña parte de activos corresponden también a la red fluvial como transporte de mercancías y servicios a departamentos como Guainía, Vichada y Guaviare. Aunque, el transporte carretero sigue siendo uno de los más utilizados por su cobertura y facilidad de acceso al nivel de servicio, frente a otros modos de transporte, por lo cual asegurar la calidad y disponibilidad de servicio en las vías ofrecerá mejores beneficios al desarrollo y competitividad del país. (CPC, 2020).

Debido a su exposición directa, el sector transporte es uno de los más golpeados por el cambio climático y la variabilidad climática, dejando daños considerables y cuantiosas pérdidas, sumado a interrupciones constantes al sistema que generan perdidas al comercio y disminución a la calidad de vida de habitantes y usuarios que se ven afectados por los cierres de vías. Solo para el 2021 el INVIAS registro que se presentaron 1130 emergencias en la red vial de 27 departamentos relacionados con caídas de rocas, perdida de banca, deslizamientos, socavación, hundimiento de calzada e inestabilidad de talud que dejaron 2953 vías afectadas, 346 puentes

vehiculares y 247 peatonales; 471 acueductos y 109 alcantarillados. Para El 2022, se atendieron 1232 emergencias con 600 cierres parciales y 527 cierres totales debidas a la Ola Invernal de ese año.

En la información entregada para el INVIAS a finales del 2023 se reportaron 4710 emergencias atendidas durante el periodo del 2021 – 2023 solo en la red vial primaria concesionada y no concesionada, y la afectación de 26 carreteras en la red vial terciaria, que estiman un total de 478.579,6 millones en daños a la infraestructura vial, siendo los movimientos en masa, los eventos más frecuentes, seguidos por la caída de material, arboles, inundaciones por avenidas torrenciales, desbordamiento de fuentes hídricas, pérdida de banca por socavación, afectación de puente vehicular, subsidencia y afectación de muros de contención. (UNGRD, 2023).

El aumento de temperatura, la influencia humana y las concentraciones de GEI ha generado cambios en la atmosfera, en el océano y la tierra generando eventos como aumento de temperatura, precipitaciones más intensas y frecuentes, aumentos del nivel del mar, sequias que se han fortalecido con respecto a pasados informes del IPCC (2021), y que se incrementaran en años venideros. América Latina y Caribe enfrentan un gran reto debido a una alta vulnerabilidad propia de su diversidad geográfica, actividad económica e industrial y desarrollo social que a lo largo de los años aportaron una carga importante de emisiones a la atmosfera y sumados a fenómenos climáticos típicos de la región como el Niño, la Niña y el paso de ciclones tropicales ha intensificado los eventos climáticos.

El panel intergubernamental define que las características físicas, geográficas, económicas, sociales y culturales de Colombia lo posicionan como un país altamente vulnerable, recrudecidas durante el periodo del 2021 al 2023 por la emergencia sanitaria por COVID - 19. Una visión sobre el potencial de daño atribuido a recrudecimiento de eventos climáticos para la región se dio en el país en el periodo 2009 – 2010 con un primer semestre caracterizado por altas temperaturas y un clima bastante seco e intenso en las regiones Andina, Caribe y Pacífica agudizado por el fenómeno del Niño. Para comienzos de mayo del 2010 las temperaturas bajaron dando entrada al fenómeno de la Niña, que aunados a temperaturas cálidas del caribe y atlántico altero las variables climáticas generando un aumento en intensidad y duración de las precipitaciones que no se había esperado y para el que la nación no estaba preparada. Los registros históricos determinaron que el segundo semestre del 2010 se registraron los valores de precipitación más altos en los últimos 40 años que pusieron en alerta 28 de 32 departamentos en emergencia invernal, dejando pérdidas económicas de 40 millones de dólares y más de 3 millones de personas afectadas (IDEAM,2010).

Según el Departamento Nacional de Planeación, y la UNGRD el periodo del 2021 al 2023 se caracterizó por ser un periodo marcado por la intensidad por excesivas precipitaciones a partir de la mitad del segundo semestre del 2020, y aunque se tuvieron aumentos de temperatura que indicaba la entrada del periodo del Niño, marcaron la condición siempre dentro de los umbrales del fenómeno de la Niña hasta agosto del 2023 donde según el indicador ONI (Índice Oceánico del Niño) registro un retorno a la neutralidad, siendo esta una ocasión marcada definitivamente como anómala considerando que el fenómeno persistió durante tres años (UNGRD,2023), siendo el primer episodio triple del siglo XXI y generando que en el 2012 se emitiera la declaratoria Desastre Nacional a partir del decreto 2113 del 1 de Noviembre del 2022.

Y Aunque bien el país ha enfrentado un mayor número de emergencias relacionados al aumento de precipitaciones, en el contexto nacional las altas temperaturas también son un fenómeno meteorológico de cuidado y seguimiento, ya que estos meses donde las temperaturas aumentan marcadas por el fenómeno del

niño han registrado valores por encima del promedio para el periodo (1991-2020), siendo el 2024 uno de los años con la temperatura más alta registrada por el NOAA, asociada con el fenómeno del Niño/Niña que afectan la vida útil de los materiales del pavimento, y la vegetación en la zona que influyen en la infraestructura.

Así mismo, debido a que al menos el 30% del territorio colombiano tiene contacto con el mar y aunque solo el 9% de la infraestructura vial se encuentra en este territorio, el aumento del nivel del mar y fenómenos climáticos como marejadas ciclónicas también representan un objeto de consideración para evaluaciones de riesgo teniendo en cuenta factores como el calentamiento global y las proyecciones entregadas por el IPCC (2021) para el 6 informe donde se anuncia que para el 2050 el aumento podría estar en los 28cm, y alcanzar los 55cm para el 2100 a nivel global.

Razón por la cual, tras la emergencia vivida en 2012 Colombia instauro organismos que vigilan, estudian y establecen políticas, planes y recursos para preparar al país frente a los fenómenos climáticos propios de la región y el cambio climático, previsto por las Naciones Unidas y el IPCC (Panel intergubernamental de expertos sobre el cambio climático). De acuerdo al Plan Nacional de adaptación al Cambio Climático (2012) el fin de la utilización de estos recursos y elementos debe ser la reducción de la vulnerabilidad, entender y considerar, y buscar la adaptación a los factores que pueden afectar los distintos elementos expuestos que enfrentan las amenazas del clima y su variabilidad.

Considerando que según el DNP el 90% de Emergencias reportadas en los últimos 50 años se dieron por fenómenos hidrometeorológicos intensificados por los fenómenos del Niño y la Niño trabajar y desarrollar una metodología que pueda ser usada en la infraestructura vial carretera en búsqueda de la eficiencia, resiliencia y el manejo de toma de decisiones frente a eventos amenazantes es una necesidad, y también podría ofrecer una manera de que esta sea replicada y ajustada a otros modos de transporte en búsqueda de la protección del sistema y un paso a la conectividad de estos.

4. MARCO CONCEPTUAL:

A continuación, se relaciona el listado de términos y conceptos a utilizar dentro de este trabajo grado:

Adaptación: Ajuste de sistemas naturales o antropológicos a estímulos climáticos actuales o esperados, con el fin de moderar perjuicios o explotar oportunidades beneficiosas en respuesta a los cambios observados y su variabilidad. (PNACC, 2012)

Amenaza: Probabilidad de la potencial ocurrencia de un evento adverso que puedan tener impactos físicos, económicos, sociales y ambientales. Su origen puede derivar de acciones humanas, de manera accidental o de manera natural. (Ley 1523, 2012)

Amenaza climática: Amenaza potencial de ocurrencia de eventos climáticos que generen un impacto físico, económico, social y ambiental en una zona cada cierto tiempo caracterizada por la frecuencia, intensidad y localización. (Cardona y otros, 2012)

Calamidad pública: Resultado que desencadena de a manifestación de uno o varios eventos naturales o antropogénicos no intencionales que al encontrar condiciones de vulnerabilidad propicias para su desarrollo genera interrupciones y afectaciones extendidas, graves e intensas que requieren de acciones inmediatas en respuestas al evento. (UNGRD, 2014)

Cambio Climático: Importante variación estadística en el estado medio del clima y su variabilidad, persistente durante un periodo prolongado (decenios e incluso más). El cambio climático puede deberse a procesos naturales internos o cambios de fuerza externos, que pueden ser cambios en ciclos solares, erupciones o cambios antropogénicos persistente que alteran la atmosfera. (Ley 1523, 2012)
Contingencia: Condición, situación o conjunto de circunstancias existentes que generan incertidumbre sobre perdidas, y su resultado o consecuencias serán determinados una vez suceda el evento o se deje de incurrir.
Desastre: Resultado de varios eventos adversos de origen natural o antropogénico no intencionales que al encontrarse con condiciones de vulnerabilidad propicias (Física, social, económica, ambiental) causa daños, pérdidas humanas, materiales, económicas y ambientales que generar una alteración grave, intensa en el funcionamiento de la sociedad, y que exige la ejecución de acciones y/o medidas de respuestas para afrontarla, rehabilitar y reconstruir. (Ley 1523, 2012)
Emergencia: Situación caracterizada por una alteración o interrupción grave e intensa causada por un evento amenazante o la inminencia del mismo que pueda afectar el funcionamiento de una comunidad, y que requiera de acciones inmediatas de parte de instituciones estatales. (UNGRD, 2014)
Exposición: Refiere a la presencia de personas, infraestructura, medios de subsistencia, recursos económicos, bienes culturales que pueden verse afectados o amenazados por su localización. (Ley 1523, 2012)
Fenómeno de La Niña: Fenómeno oceánico caracterizado por el enfriamiento de las aguas en el pacífico tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador, y Sur de Colombia, lo cual repercute en regímenes de temperaturas, precipitaciones en diversas partes del mundo (WMM, 2024)
Fenómeno del Niño (ENOS): Una interacción del Océano Pacífico Tropical y la atmósfera global que resulta en episodios cíclicos de cambios en los patrones oceánicos y meteorológicos en diversas partes del mundo, frecuentemente con impactos considerables durante varios meses, tales como alteraciones en el hábitat marino, precipitaciones, inundaciones, sequías y cambios en los patrones de las tormentas. (UNISDR, 2009)
GEI: Son componentes gaseosos que, en la atmosfera de origen natural o antropogénico, que absorben y remiten radiación infrarroja, que debido a su aumento en la atmosfera ajusta el clima terrestre caracterizado por un aumento de temperaturas. (PNACC, 2012)
Gestión de riesgos: Es el proceso de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo, la gestión de riesgo debe promover conciencia, evitar o impedir que se genere, y reducir, controlar o preparar para enfrentar la amenaza frene a la existencia de la misma, además del manejo posterior a la ocurrencia de un desastre, la reconstrucción y rehabilitación. Las acciones orientadas a la gestión de riesgo deben promover la seguridad, bienestar y calidad de vida a las personas. (PNACC, 2012)
Impacto: Orientadas al cambio climático, son todas aquellas consecuencias en sistemas humanos y naturales generados por una alteración (PNACC, 2012)
Mitigación: Toda acción, cambio, política destinada a reducir la emisión de gases invernadero y a potenciar sumideros. (PNACC, 2012)
Mitigación de riesgos: Toda acción, cambio, medida o política destinada a reducir o disminuir los daños, perdidas que se puedan presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada, con el objetivo de reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad existente. (PNACC, 2012)
Planes de Emergencia y Contingencia: Documento donde se define las políticas, la organización y los métodos, que indican la manera de enfrentar una situación de emergencia, o desastre tanto en lo general como en lo particular. (UNGRD, 2014)

PNGRD (Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres): Instrumento mediante el cual se definen los objetivos, programas, acciones, responsables y presupuestos, por los cuales se ejecutan procedimientos y procesos de conocimiento de riesgo, reducción de riesgo y de manejo de desastres en el marco de la planificación del desarrollo nacional. (UNGRD, 2014)
Riesgo: Corresponde a los daños o perdidas potenciales que pueden presentarse por la ocurrencia de eventos físicos peligrosos de origen natural o generado por acción humana no intencionada en un lugar y momento determinado, y que puede generar daños y perdidas físicas. (UNGRD, 2014)
Redundancia: Disponibilidad de alternativas en el caso de que un determinado itinerario clave no se encuentre disponible, de manera que pueda usarse otros itinerarios en casos de emergencia con el fin de evitar el aislamiento de las regiones que conecta. (UNISDR, 2009).
Resiliencia: Capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de hacer frente a un evento, tendencia o perturbación peligrosa, respondiendo o reorganizándose de manera que mantengan su función, identidad y estructura esenciales, así como su capacidad de Adaptación, aprendizaje y transformación. (UNISDR, 2009).
Respuesta: ejecución de acciones necesarias para la atención de una emergencia como accesibilidad, transporte, telecomunicación, evaluación de daños y análisis de necesidades en salud, saneamiento básico, búsqueda y rescate, extinción de incendios y manejo de materiales peligrosos, albergues y alimentación, servicios públicos, seguridad y convivencia, aspectos financieros y legales, información pública y el manejo general de la respuesta, entre otros. La efectividad de la respuesta depende de la calidad de preparación (Ley 1523 de 2012).
Sensibilidad: Grado o índice en el que un sistema puede resultar afectado negativa o positivamente por estímulos relacionados con el clima. (PNACC, 2012)
Variabilidad climática: Hace referencia a las variaciones de las características estadísticas del clima en diferentes escalas temporales y espaciales, más amplia que fenómenos meteorológicos, y pueden ser causadas por cambios naturales en el sistema climático o cambios externos naturales o cambios en patrones humanos. (PNACC, 2012)
Vulnerabilidad: Susceptibilidad, resistencia o fragilidad física económica, social, ambiental o institucional que puede afectar una comunidad al verse expuesta a un evento adverso, generando daños y perdidas. (PNACC, 2012)
Vulnerabilidad funcional: continuo funcionamiento del uso asociado a un activo, vía o infraestructura asociados a cierres parciales o totales al enfrentar un evento amenazante. (INVIAS, 2022)
INVIAS (Instituto Nacional de Vías)
ANI (Agencia Nacional de Infraestructura)
SNGRD (Sistema Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres)
UNDRR (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres)

5. MARCO LEGAL:

En el Contexto internacional el cambio climático y la variabilidad climáticas se ubican como una de las principales problemáticas en la agenda debido al impacto directo sobre el estilo de vida y costumbres, la economía, salud y educación. Frente a la situación, en 1988 dos de las agencias de la Organización de las naciones Unidas (ONU), la organización mundial meteorológica (OMM) y el programa de las naciones unidas para el medio ambiente (PNUMA) crean el Panel intergubernamental sobre el cambio climático en 1988, desarrollado como un grupo interdisciplinar para la investigación en la materia. Es por esta razón que en 1990 se solicita la creación de un tratado sobre el cambio climático, el cual da inicio conversaciones sobre la

convención Marco, que ve la luz dos años después en Rio, en la cumbre de las naciones unidas como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Con la Ley 164 de 1994 Colombia se une a la CMNUCC con el fin de tomar acciones frente a la compleja situación; Estableciendo compromisos para generar medidas de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI), facilitar la comprensión del riesgo, causas, efectos, magnitud de los cambios y consecuencias de estrategias adaptación. Tres años más tarde en la celebración de la convención Marco en Japón, se establece el protocolo Kyoto donde se consigna las metas de reducción de GEI a países industrializados, la cual que queda ratificada con la Ley 629 del 2000 en el país, esbozando los primeros lineamientos sobre las principales estrategias para la mitigación de Cambio Climático. (PNACC, 2016).

Durante los 2002 a 2005 se crea la oficina Colombiana para la mitigación del Cambio Climático, hoy conocida como Grupo de Mitigación para el cambio climático (GMCC) del Ministerio de ambiente encargado de desarrollar los lineamientos y resoluciones necesarios para abordar las medidas dispuestas en la convención, incluyendo la promoción y apoyo de proyectos MDL (Mecanismo de desarrollo limpio) capaces de entrar en el mercado mundial contemplado por el Protocolo Kyoto en virtud de la resolución 340 del 2005.

De la mano con el desarrollo de esta oficina, se establece al IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales) como la entidad encargada de coordinar la elaboración de comunicaciones ante la CMNUCC en virtud del Decreto 291 Artículo 15 del 2004 (Ministerio de Ambiente, 2015). Para 2010 se desarrolla de la décima convención MARCO se asume el Compromiso de formular la estrategia nacional de Educación, Formación y sensibilización de públicos sobre el cambio climático y que llevo a que en el PND (Plan Nacional de desarrollo) 2010 -2014 se ordenara la formulación del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático como parte de las 4 estrategias encaminadas al desarrollo sostenible frente al cambio Climático.

Posteriormente, se establece en el CONPES 3700 del 2011 la estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia del cambio climático en Colombia para la integración de la problemática dentro de la planificación, la articulación de entidades que produjeran información de calidad y de libre acceso, y un marco para establecer acciones en el momento necesario. (DNP, 2011) En base a esta misma directriz se establece en el 2012 el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres bajo la ley 1523 que adopta la política Nacional de la gestión del riesgo de desastres, y se expide a su vez el plan nacional de gestión del riesgo de desastres con el propósito explícito de contribuir al bienestar, calidad de vida y seguridad de las personas, el desarrollo sostenible de la nación y además hace parte de los referentes para la adaptación al cambio climático. (Ministerio de Ambiente, 2015).

Buscando integración de la agenda climática a la planificación del país para la adaptación al Cambio Climático, y el desarrollo sostenible el PND 2014 – 2018 definió la estrategia envolvente de crecimiento verde como un marco general y buscando la necesidad de consolidar la política Nacional de cambio climático para su integración en la planificación ambiental, territorial y sectorial apoyada en el artículo 17 de la ley 1523 de 2012 que busca que los diferentes sectores formulen e implemente planes sectoriales de adaptación al cambio climático. (Ley 1523, 2012)

Para el año 2015 se lleva a cabo la COP 21 en París que rescata el compromiso de los participantes por mantener el aumento de la temperatura por debajo de los 2°C, enfocando los esfuerzos de las acciones en la creación de

planes de acción que aportan al aumento de la resiliencia, y estrategias para de desarrollo a largo plazo con bajas emisiones de GEI para el 2020. A su vez, la Organización de las Naciones Unidas estableció 17 objetivos de desarrollos sostenible, con el fin de integrar las esferas económica, social y ambiental articulándose al objetivo del acuerdo de París.

A su vez para este mismo año mediante el decreto 1081 del 26 de mayo de 2015 se reglamenta el procedimiento para la expedición y formulación del plan Nacional de gestión de Riesgos, donde el Unidad Nacional de Gestión de Riesgos – UNGRD Formaliza la estructura lógica, pasos y el proceso que se seguirá para el establecimiento, y actualización frente al SNGRD, para ver la luz en el 2016 bajo decreto presidencial 308 y adoptado como el Plan Nacional de Gestión de riesgos - PNGRD 2015 – 2025 "Una estrategia de Desarrollo". (Cabrera & Gutiérrez, 2024)

En el 2016 es creado Sistema Nacional de Cambio Climático - SISCLIMA como una estructura político-administrativo-intersectorial en material ambiental, especializado en la variable del cambio climático, y encargado de articular y evaluar las acciones para la adaptación al cambio climático y la mitigación de los GEI (Guardela, L. 2020). Al año siguiente el país presenta la política Nacional de Cambio Climática direccionada a un crecimiento sustentable alimentándose de la información obtenida de SISCLIMA, buscando la sinergia entre sectores contempladas por los PND.

Como ampliación de la Ley 1523, El Sistema Nacional de gestión de riesgos también presenta una ampliación para el 2017 con el decreto 2157 integrando el alcance de planes de gestión del riesgo de desastres a entidades públicas y privadas con la integración a la información destinada en planes en otros instrumentos de planificación en los que se haya definido amenazas. En articulación con la gestión del riesgo de desastre, un año después se establece Ley 1931 de 2018 buscando integrar la legislación ambiental y la toma de decisiones de personas públicas, privadas, naturales y jurídicas en materia del Cambio Climático, evidenciando que la problemática no solo recae en el estado si no en los interesados. Así también incorpora los planes integrales de gestión del cambio climático sectoriales y territoriales como instrumentos para evaluar, priorizar y definir medidas de adaptación. (UNGRD, 2020)

Bajo la resolución 1978 del 2 de septiembre del 2020, el Instituto Nacional de Vías – INVIAS adopta el Plan de Gestión de Riesgos institucional 2019 – 2030, en seguimiento a la Ley 1523 del 2012 y la Ley 1913 del 2018, para orientar a la institución en la identificación, priorización, formulación de opciones de adaptación y mitigación, y seguimiento del riesgo en la infraestructura de transporte contribuyendo a proteger a la población, mejorar la sostenibilidad del instituto y generar competitividad y desarrollo al País. (INVIAS, 2022).

En el 2022 se Expide la actualización del PNGRD, bajo el decreto presidencial 1478 del 3 de agosto de este año, donde se privilegia el abordaje y manejo para el Cambio Climático, y un enfoque integral de emergencias alineado con las cuatro prioridades suscritas al Marco de Sendai 2015 -2030.

Por otra parte, si bien la Agencia Nacional de Infraestructura - ANI cuenta con herramientas, procesos y subprocesos para la evaluación de riesgo, no establece un plan de gestión de riesgo orientado al cambio climático formulado para la agencia, sin embargo, por medio de la obligación contractual establece que el o los concesionarios deben desarrollar un PGRD en el proyecto que cubra la construcción, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura. Aun así, como se mencionó antes posee herramientas que pueden orientar al equipo de profesionales en el desarrollo de la labor como el manual de Gestión Ambiental que fue publicado

en el 2019, y cuenta con una actualización para el 2024; además también junto a él INVIAS, el departamento de desarrollo internacional del Reino Unido, el Departamento nacional de Planeación, los ministerios de transporte y ambiente de Colombia, la unidad de gestión de riesgo desarrolló en el 2014 desarrollan el Plan de Adaptación de la red vial primaria de Colombia.

6. ESTADO DEL ARTE:

Los trazados viales constituyen un factor muy importante para el desarrollo socioeconómico de las regiones ofreciendo conectividad a grandes ciudades y centros logísticos, a la par de sectores periféricos a los cuales ayuda a mover sus productos o economía, además de su impacto en la calidad de vida de los habitantes de las comunidades a las que beneficia, lo que hace que sean un objetivo de inversión importante para el país a fin de lograr una alta conectividad, sostenibilidad e integración del sistema transporte. Si bien Colombia tiene otros modos de transporte de pasajeros y carga, el carretero ocupa el 83% y 90% de participación, respectivamente, siendo el más importante actualmente y con una inversión para el 2021 de 8,5 billones de pesos dirigido a infraestructura vial. (CNP, 2023)

Sin embargo, este desarrollo e inversión están determinados por el factor climático, al cual la humanidad se ha tenido que adaptar desde el principio de los tiempos contemplándolo dentro de sus actividades económicas, sociales, agrícolas y de construcción. Esta estrecha relación que guarda la infraestructura con el clima se debe principalmente a la exposición que tiene a los estímulos climáticos (Temperatura, precipitación, vientos, mareas, etc.) lleva a que sea considerada desde las primeras fases del desarrollo de un proyecto y a lo largo de su vida útil (50 a 70 años). No obstante, la nación enfrenta importantes retos climáticos, debido a la vulnerabilidad tanto geográfica como climática a la que está expuesta, según el Banco mundial (2021) tiene una calificación 10 de 14 factores donde se incluyen elementos de riesgo, exposición, vulnerabilidad e impactos futuros de riesgo climático, y una de las tasas más altas de daños causados por desastres naturales en toda Latinoamérica.

Evidencia de esto fue el periodo del 2010 – 2011 donde el fenómeno de la niña inusualmente extremo causó pérdidas de 11,2 billones de pesos donde el 38% corresponde al sector infraestructura, de la cual el mayor impacto la recibió el sector vial en las regiones caribe, andina y el norte de la región pacífica (CDKN, 2014). Las experiencias en base a la contingencia que dejo afectada a una gran parte de la población logró concientizar al gobierno y los sectores involucrados de la adaptación al cambio climático y la importancia de generar vías resilientes, la condición cambiante del clima, la variación de temperatura y las precipitaciones como lo indica sexto informe de evaluación del IPCC (2021) y como quedo registrado con los más recientes eventos dejado por el fenómeno de la Niña del 2021- 2023, seguido por las altas temperatura registras a inicios del 2024.

El Aprendizaje de los eventos amenazantes y el entendimiento de la vulnerabilidad deben estar encaminados a medidas que permitan abordar y enfrentar dichos eventos con soluciones o respuestas costo-efectivas, maximizar las inversiones y reducir la vulnerabilidad de la red carretera (Banco de desarrollo de América Latina -CAF, 2018). Por lo que no se debe tratar de atender emergencias en la red vial en función de su estado o deterioro, se trata de comprender de manera integral la vulnerabilidad, la amenaza y la exposición, de los elementos construidos y de los elementos proyectados.

En base a este objetivo, Vulnerability Assessment and Adaptation Framework, 2018 [Evaluación de vulnerabilidad y Marco de Adaptación] desarrollado por La Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA) ofrece un marco de trabajo para ayudar a agencias e interesados a evaluar la vulnerabilidad del

sistema de transporte a los efectos del cambio climático y la variabilidad desde el entendimiento del riesgo que representa, permitiéndoles revisar los impactos asociados y las oportunidades para enfrentarlos, dirigiendo estrategias de adaptación que puedan ser aplicados en la toma de decisiones para el diseño, planeación, revisión, operación, manejo y mantenimiento de una red vial más resiliente. Se enfoca en las metodologías de análisis multicriterio y análisis económico para evaluar las opciones de adaptación que se aplicaran dependiendo del enfoque y alcance de quien conduce la evaluación, mientras ofrece un paso a paso de como dirigir la evaluación de vulnerabilidad.

Su aporte ofrece una pauta para la aplicación de una metodología que ha desarrollado varios pilotos de adaptación y resiliencia en las carreteras, brindando pautas del desarrollo y adecuación de la metodología a las condiciones de vulnerabilidad de la región para desarrollar un lineamiento acorde y eficiente.

En base a este Marco de Adaptación, para el 2019 México desarrolla un marco metodológico para la adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático, la cual es una guía de la integración de herramientas y conocimientos en la evaluación, adaptación y construcción resiliente a las problemáticas del país, y a los sectores que intervienen en el desarrollo de las vías nacionales además de compaginarla con el análisis y gestión de riesgos. Debido al contexto latinoamericano, el marco propone una visión de algunos fenómenos climáticos propios de la región apoyado de la experiencia del manejo de evaluación de vulnerabilidad al cambio climático del Marco Internacional de Adaptación al cambio climático para la infraestructura vial, 2015, diseñado por la asociación mundial de carreteras (PIARC).

Otro estudio de importancia en un contexto nacional es el Plan de Adaptación de la red vial primaria de Colombia – Plan Vías-CC (2014) desarrollado por el Gobierno de Colombia, en compañía de departamentos e institutos de vías y transporte (Agencia Nacional de Infraestructura – ANI), instituciones de investigación climática y la financiación y apoyo de organismos internacionales, crearon en cumplimiento del plan nacional de adaptación al cambio climático (PNACC) y el fortalecimiento de la red vial primaria incorporando estrategias, medidas concretas y acciones de adaptación frente al cambio climático, y la variabilidad climática, también presentar los retos y oportunidades a los que se enfrentan los diversos actores en el sector de infraestructura vial frente a las proyecciones climáticas del 2040.

Un estudio fundamental debido a que presenta los retos y oportunidades que enfrene el país para lograr un marco metodológico de adaptación y evaluación de vulnerabilidad de carreteras al cambio climático, con indicadores de exposición y vulnerabilidad propias de la región y aplicadas en la red vial primaria, y un estudio de riesgo del sistema primario.

7. PROBLEMÁTICA:

La región de América latina y Caribe posee una amplia gama de contrastes en regímenes de temperaturas y precipitaciones, con un territorio que posee espacios bastantes secos de altas temperaturas y regiones húmedas con predominancia en lluvias. El ALC (América latina y el Caribe) posee periodos mensuales en donde se presenta una temporada de lluvias y una temporada seca que se intensifica con los eventos climáticos reforzados por los fenómenos de la Niña y El Niño. (Banco Mundial, 2023)

En los Últimos 50 años Colombia ha enfrentado amenazas importantes de origen meteorológico, que debido a su posición geográfica han colocado al país en una situación desfavorable siendo reconocido como el país con la tasa más alta de daños causados por desastres naturales y fenómenos climáticos (Banco Mundial, 2022). Bajo

esta consideración, la vulnerabilidad del país incrementa cuando se toman en cuentan factores sociales y políticos derivados de la desigualdad y pobreza, la búsqueda de la estabilidad y mantenimiento de la paz posconflicto, y una dependencia económica de sectores expuestos a fenómenos meteorológicos intensos, que aún en la actualidad están en recuperación tras la desestabilización dejadas por la coyuntura del COVID-19.

En este sentido la infraestructura posee una relación directa con el clima, siendo la infraestructura vial una de las más ligadas a esta condición debido a su exposición a precipitaciones, régimen hídrico, temperatura, entre otros factores. Históricamente en la planificación de vías se han tomado los factores previamente enunciados en consideración, con el fin de que dichas estructuras resistan a lo largo de su vida útil. Sin embargo, el acelerado cambio climático y los eventos climáticos extremos que enfrenta el país, han demostrado que es necesario nuevas previsiones que tengan en cuenta estos fenómenos y reduzcan la vulnerabilidad de las carreteras.

El Banco Mundial (2023) cataloga a Colombia como uno de los países con un mayor índice de exposición al riesgo siendo amenazas claves para el sector carretero: las sequías, inundaciones y deslizamientos de tierra, frente a los aumentos de temperatura e incrementos en la frecuencia de fenómenos meteorológicos reportados por el IPCC en el 2023, estas amenazas ofrecen un panorama poco alentador, si se remonta a los desastres causados por los eventos de La Niña para los periodos del 2010-2011 y el 2020-2023 y las altas temperaturas registradas en los últimos años, que han dejado serias afectaciones a la infraestructura vial y a su vez pérdidas asociadas a los cierres viales, y desastres en vía.

Según el PNGRD (2022), desde 1998 hasta el 2020, el 87% de desastres ocurridos fueron por origen meteorológico, de los cuales el 31% fueron por sequias e incendios, 27% por inundaciones, 14% a causa de deslizamientos de tierra, 12% a causa de vendavales y 2% por avenidas torrenciales. En un informe sobre el clima y desarrollo del país, el Banco Mundial (2023) pronostica que para el 2050 la cantidad de personas afectadas por inundaciones se triplicaría, se multiplicaría por 6 la cantidad de días con temperaturas superiores a los 35° C, y las disrupciones por cierres viales provocadas por agentes climáticos podrían afectar al 60% de la población en el territorio nacional.

La alta vulnerabilidad que tiene la región ha llevado al gobierno a mancomunar esfuerzos con el fin de generar opciones de adaptación, estrategias y políticas que mitiguen los efectos del cambio climático y herramientas que permitan el desarrollo de vías resilientes y sostenibles, bajo las consideraciones de la importancia de la infraestructura para la competitividad y el desarrollo de varios sectores que dependen de la conectividad. En el informe de Evaluación de daños, perdidas e impactos asociados a la ocurrencia del fenómeno de la Niña más reciente, el gobierno presenta que las afectaciones dejadas por las contingencia fueron del orden de 282.409,5 Millones de pesos, donde el 99% de las pérdidas se dieron en las red vial primaria correspondientes a la reducción de ingresos por cierres de peajes, cierres viales que implican mayores distancias y tiempos de recorrido que traducen en un incremento de costos derivados de la operación de vehículos y el montaje de estructuras provisionales, esto además del impacto que tuvo en las poblaciones que se vieron privadas del acceso a sus regiones por diferentes daños, al igual que al acceso a diferentes servicios como salud, educación y mercancía.

Frente a esta problemática, la comprensión de la vulnerabilidad y la importancia de la adaptación a factores climáticos es imprescindible, considerando que estas amenazas no dejaran de existir y que en base a la investigación actual solo se intensificaran sus efectos es necesario contar con herramientas que persigan generar conocimiento sobre la situación, una guía que ayude a los profesionales a desarrollar buenas prácticas en la adaptación de vías nuevas y existentes de cualquier categoría, a base de una compilación de acciones y medidas nacionales e internacionales existentes aplicables al contexto de la región.

Teniendo en cuenta la infraestructura usada en el país, y los indicadores climáticos que permitan una mayor previsión en los proyectos de infraestructura a fin de crear vías resilientes, mayor sostenibilidad y la protección de las inversiones a largo plazo.

8. ENFOQUE DEL ESTUDIO:

Si bien Colombia es uno de los países más avanzados de Latinoamérica frente al tema, en materia de investigación sobre adaptación al cambio climático aún resulta insuficiente y la revisión que se tiene sobre esta gracias a la Ley 1891, que establece el desarrollo de planes de adaptación al cambio climático departamentales, municipales y por agencia esta diversificada en varias fuentes, de la cuales siguen su desarrollo de manera independiente pero que brindan aspectos claves aplicables al desarrollo de un objetivo en común, las cuales pueden verse potenciadas por experiencias de otros países y pilotos de resiliencia que puedan ser usados como opciones de adaptación en nuestras vías.

Se realizará una revisión documental que permita conocer factores climáticos y los fenómenos naturales derivados de estos que impactan la infraestructura carretera, la infraestructura típica colombiana y buenas prácticas de adaptación de vías al cambio climático en el país, y en otros países que puedan ser replicables a nuestro contexto climático y geográfico. La ejecución de esta investigación debe desarrollar un estudio que ofrezca a los profesionales interesados una herramienta para abordar a la adaptación desde la caracterización de los activos del sistema vial, los indicadores climáticos y variables que puedan ser una amenaza a las estructuras, para enfocarse en su tratamiento y generar un camino a la resiliencia.

Por eso el alcance de este documento debe ser una compilación de esas buenas prácticas que permita al país a desarrollar herramientas para el entendimiento del riesgo, la amenaza, el estudio de la vulnerabilidad y finalmente la adaptación a fenómenos hidrometeorológicos y la variabilidad.

9. METODOLOGÍA:

La metodología usada en este trabajo de grado será una investigación documental, a base de fuentes bibliográficas que contengan información sobre estudio de vulnerabilidad, adaptación y resiliencia al cambio climático para carreteras. La investigación se desarrollará en documentos como guías, planes de gobierno, políticas y estudios de vulnerabilidad que permitan extraer buenas prácticas para usar en la planificación, construcción, mantenimiento y rehabilitación de carreteras.

Fase 1. Identificación de factores climáticos de la región.

Fase 2. Identificación de componentes de la infraestructura vial.

Fase 3. Compilación de Buenas Prácticas de Adaptación en infraestructura vial.

Fase 4. Recomendaciones, retos y oportunidades.

9.1. CAPITULO 1: FACTORES CLIMATICOS QUE IMPACTAN LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA COLOMBIANA:

Para la infraestructura los factores climáticos determinan en gran medida como será el rendimiento del activo que se construirá en una u otra región. Como se ha abordado en la introducción de esta revisión, la relación entre infraestructura carretera – Factores climáticos es estrecha, y para entenderla en este capítulo se compilo información sobre las variables climáticas claves por su impacto en la infraestructura vial, analizadas por región, en base a información depositada en entidades como el IDEAM, el ANLA y el IPCC.

Esto comprende también la información acerca de variabilidad climática que comprende aquellos fenómenos de ocurrencia temporal que pueden generar que estas variables se desarrollen de manera distinta a como están acostumbradas a desarrollarse; y Cambio climático que comprende los escenarios frente a los cuales la dinámica climática estará predispuesta a funcionar en consideración a la cantidad de GEI (gases de efecto invernadero) y emisiones solares se presenten.

Este desarrollo está orientando a entender que variables climáticas serán consideradas una amenaza para las carreteras, y también poder estimar de manera cualitativa en base a los escenarios descritos por el IDEAM en la Tercera comunicación Nacional para el Cambio Climático, la variabilidad climática y el clima actual el nivel de amenaza que será dicho evento (Ver Matriz 1 Tabla 6 capítulo 3).

9.1.1. CLIMA PROYECTADO E HISTORICO:

Colombia se encuentra ubicada en la zona Intertropical del planeta, entre el trópico de cáncer y el trópico de capricornio, presenta muy poca variación de temperaturas anualmente, y no experimenta cambio de estaciones (invierno, otoño, verano y primavera). Con un régimen de estaciones bimodal que se presenta a lo largo de su territorio y está definido por dos periodos de lluvia – de abril a junio y de agosto a noviembre – y dos estaciones de verano. Sin embargo, debido a su diversidad geográfica y medioambiental, las temperaturas por región pueden oscilar entre los 30°C a 0°C, donde las precipitaciones también fluctúan siendo menores, mayores o casi nulas.

Según el diario la Republica (2023) el país se divide un 60% de territorio que experimenta clima tropical que se segmenta en 25% ecuatorial o tropical húmedo, 18% Monzónico o subsectorial y otro 18% que corresponde a clima de sabana o seco; el 40% restante se divide en clima seco, templado y de alta montaña. Estas diferencias en clima por regiones dentro de la región del país dependen de la localización en medio de la distribución mundial de energía (Calor y viento) y Masa (humedad, nubosidad y precipitación) (IDEAM, 2018)

9.1.1.1. Variabilidad Climática:

Si bien se menciona anteriormente que debido a ciertos factores Colombia posee marcados regímenes climáticos en diferentes partes del territorio, también es cierto que sus efectos amenazantes también están en gran parte desarrollados por anomalías propias de eventos climáticos dados entre la relación de atmosfera, océano y tierra, y la radiación solar, estas fluctuaciones se conocen como variabilidad climática (IDEAM, 2018).

Para la determinación de la existencia de la variabilidad climática, dentro de la investigación se debe tener en cuenta la existencia de un patrón climatológico que represente las condiciones predominantes durante un amplio periodo de tiempo, generalmente 30 años, en los que se pueda caracterizar el clima de una región. Lo cual se hace por medio del cálculo de promedios de medición en variables climatológicas (Temperatura del aire, humedad relativa, precipitaciones, presión atmosférica, entre otros) y asi mismo también frecuencia de fenómenos extremos. Los promedios multianuales durante el tiempo establecido se le conocen como la norma (o normal) climatológica y la

diferencia de promedios multianuales con la norma es denominado como anomalía climática. Su secuencia de estas oscilaciones alrededor de la normal es la variabilidad climática (UNGRD, 2023).

En la valoración de la variabilidad climática existen varias escalas para definirla. Se mide la variabilidad del clima dentro de escalas mes a mes en un año, entendiendo que se pasa de estaciones (primavera, verano, invierno, otoño), aunque, para la zona dentro de la cual se encuentra Colombia, la zona tropical, se presentan temporadas lluviosas y secas en las cuales se pueden observar variaciones. Año a año estas condiciones deben repetirse en similares circunstancias; para los ciclos de precipitaciones, sin embargo, dentro de investigaciones realizadas se ha encontrado variabilidad respecto a las ***oscilaciones interestacionales*** y los ciclos de precipitación principalmente dentro del cual destaca el ciclo de 30 a 60 días asociados a las ondas de Madden-Julian (IDEAM, 2018).

Adicionalmente, esta escala también se ve finalmente afectada por los fenómenos de La Niña y El Niño. Para la región suramericana, los fenómenos de La Niña y El Niño-ENOS presentan un efecto más marcado sobre la región sobre todo en las precipitaciones estacionales, generando que las lluvias se agudicen, pero también para los meses más secos, estas disminuyan y escaseen. (Pabón, Torres; 2017)

Un ejemplo de la afectación es descrito por Córdoba- Machado (2015), el cual indica que durante los eventos provocados por la Niña Mayo-junio, se evidencia que el norte y el occidente del país, tienden a evidenciar aumentos en las precipitaciones, mientras que el sur, oriente y suroccidente presentan una caída. Seguido para los meses de julio-septiembre se visualiza un patrón bastante homogéneo entre La Niña y El Niño, con caídas de precipitación en la región o con aumentos considerables, que se extienden del suroriente al noroccidente, indicando una configuración más seca al norte y una más lluviosa al sur.

Mientras que octubre-diciembre, se evidencia que en respuesta al Niño es más débil, y el país está más bordeado por lluvias, sin embargo, bajo efectos de La Niña se presentan climas más secos hacia las zonas centrales del occidente y oriente, con anomalías positivas en el centro y sur oriente (Aumento de lluvias). En cambio, para los meses de enero-marzo la ocurrencia del Niño se presenta una significativa caída de la precipitación en el país, en algunos casos muy específicos se presentan anomalías positivas, con sequias intensas en especial en la cordillera de los Andes y la región Caribe. En esta misma línea investigativa, también existe una variación de La Niña y El Niño, catalogada como Modoki donde se tienen aumentos de precipitaciones en el sur, sur este y la zona centro-este, con caídas en el centro del país durante sus apariciones. Dentro de estas modalidades suelen generarse mayormente anomalías negativas en temperaturas en el océano con todas las connotaciones que eso conlleva para la región.

En cuanto a el impacto de las condiciones climáticas generadas por estos fenómenos también se puede ver afectada por la orografía del país generando que sean más débiles en ciertos lugares. Aunque su proceso se centra en cambiar el régimen de precipitaciones, temperaturas, vientos, entre otros, el ciclo ENOS puede darse con una frecuencia de 2 a 7 años, y en la escala de medida esta hace referencia a una ***variabilidad Interanual***.

Según el IDEAM (2023) las fases de ENOS, han sido las que mayores efectos adversos han generado al país. Para el 2020 se evidenció un enfriamiento sobre la superficie del océano pacifico tropical que dio entrada al fenómeno de La Niña en agosto 2020-2021, Alcanzando la mínima temperatura en noviembre y mantuvo sus condiciones hasta diciembre. Dentro del primer trimestre del 2021, las temperaturas bajas se mantuvieron moderadas sobre los -1.1°C y de ahí existió un aumento que alcanzó los -0.8°C, hasta julio donde retornó a condiciones frías, donde al final de año empezó a evidenciarse a un paulatino regreso a condiciones neutrales.

En cuanto a las precipitaciones, se observó un comportamiento anómalo parecido al de las temperaturas, sin embargo, es de resaltar que la aparición de La Niña posibilita los ciclones tropicales, debido a los cambios y direcciones en vientos, y esto estimuló la formación y tránsito de varias ondas tropicales que repotenciaron las

lluvias que ya tenían influencia por La Niña. Sumados a la aparición de la tormenta tropical Bonnie y el Huracán Julia desarrollaron excesos en las precipitaciones sobre todo al norte del país. Fueron los meses de septiembre – noviembre del 2021, mayo del 2022 y septiembre – octubre del mismo año los que menores excesos desarrollaron (20% a 40% aproximadamente).

Sobre el sistema todavía se pueden encontrar escalas de **variabilidad interdecadal**, que expresa los cambios sobre ciclos de diez años, más orientadas a ciclos detectados en el número de manchas solares, u oscilaciones definidas por la conexión entre el océano – atmosfera y su transporte de energía, como lo es la oscilación decadal del pacifico (ODP) con una frecuencia de cada 20 años, que puede modular o intensificar los ciclos ENOS (Garavito, 2021).

9.1.1.2. Cambio climático:

Otro factor clave en el balance está definido por el cambio climático que atraviesa la población mundial, frente a los cuales el IPCC (2023) estima que para el espacio de tiempo del 2011 – 2020 fue un 1,09°C más alta que dentro del 1850 – 1900, siendo más alta la diferencia en la tierra que en el océano, esto debido a efectos tanto naturales como acciones antropogénicas. Aunque asi mismo, también a nivel global se presentan variaciones de temperaturas negativas igual de extremas y propicia tanto olas de calor como heladas.

Mientras que frente a las precipitaciones han presentado un aumento rápido desde 1980, cambios en la fuerza de los vientos y la aparición de tormentas en los últimos años también expresa un panorama sensible que se ve afectado principalmente por emisión de los gases invernadero (GEI), y que, aunque principalmente da evidencia de un incremento que ha propiciado inundaciones, implica también escasez en algunos territorios.

Sin embargo, no son las únicas variables relacionadas al cambio climático, la expansión térmica (50%), la pérdida de hielo (22%), los mantos de hielo (20%) y los cambios de almacenamiento (8%) generaron un aumento en el nivel del mar durante 1971 – 2018.

Para Colombia, el IDEAM (2018) indica que durante la segunda mitad del siglo XX la temperatura media aumenta de 0,1°C- 0,2°C por decenio, la temperatura máxima que llegó a alcanzar es de 6°C. Con respecto al periodo de referencia 1850 – 1900, el instituto informa la probabilidad del 80% en un aumento de la temperatura de 1,5°C para los años del 2024 al 2028, y evidencia de esto es que para los años 2023 y 2024 se han registrado las más altas temperaturas medidas de 1969 a 2024, además de un retroceso marcado en los glaciares de montaña. Frente a estas tendencias también se debe resaltar, que, si bien los reportes se centran en los aumentos, los informes también se encargan de analizar los valores críticos de temperaturas mínimas.

En cuanto a precipitaciones, de acuerdo con análisis de tendencias realizadas por medio de series entre 1980 – 2011 se evidencia un aumento, aunque este no es claro, ya que mediante el análisis de las mismas tendencias se ha encontrado movimientos importantes en la estacionalidad de fenómenos hidrológicos (C. Rave et al, s.f.) es decir que, aunque se conservan niveles consistentes, existe una variación en cuanto a los tiempos en los que se tenían dichos eventos. Además, los regímenes son diferentes dentro del territorio nacional, y donde existe zonas en las cuales se evidencian eventos extremos de precipitaciones, otras están experimentando sequías importantes acordes al calentamiento global, pero también con dependencia de la predominancia de fenómenos como la ocurrencia de La Niña o El Niño (IDEAM, 2018).

En un nivel mucho menor a la información compartida por el IPCC, también se han registrado cambios en la altura del mar de 3 – 5 milímetros en el periodo de 1961 – 1990, con una tendencia de aumento de 1 – 2 milímetros por año en la costa caribe, aunque esta medida no es igual para todos los mares. Dentro de las investigaciones se registra

que la zona marítima más vulnerable es Cartagena que enfrenta además una tasa importante de subsidencia, por lo cual el aumento en esta región es más significativo (M. Moreno, 2022).

Pero para evaluar correctamente los impactos que tendrán estos fenómenos a futuro, existe la necesidad de conocer cómo se desarrollarán. El IDEAM y el PNUD (2015) dentro de la tercera comunicación de Cambio Climático, explica que los escenarios son descripciones sobre cómo puede desarrollarse cierto evento, en este caso una representación de cómo se desarrollaría el clima bajo una concentración determinada de gases de invernadero (GEI) para ciertos periodos de tiempo (2011 – 2040, 2041 – 2070 y 2071 – 2100). Para su análisis, Colombia se basó en el quinto reporte del IPCC (AR5) donde se define 4 caminos representativos de concentración "RCP's" caracterizado por su forzamiento radiativo (FR: proceso de alteración del equilibrio de energía dada por cambios solares, aumentos en emisión de gases o cambios en las propiedades reflectivas del planeta).

Escenario	Forzamiento Radiamento (W/m^2)	CO_{2eq} atmosférico (ppm)	Anomalía de temperatura	Trayectoria	Equivalente para escenarios SRES (AR4)
RCP8.5	8.5	>1370	4.9	2100, en aumento	SRES A1F1
RCP6.0	6.0	850	3	Estabilización después de 2100	SRES B2
RCP4.5	4.5	650	2.4	Estabilización después de 2100	SRES B1
RCP2.6	2.6	490	1.5	Picos antes de 2100 y después declina	Ninguno

Figura 1. los cuatro caminos de forzamiento radiativo seleccionados por el IPCC para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones en el planeta a 2011.

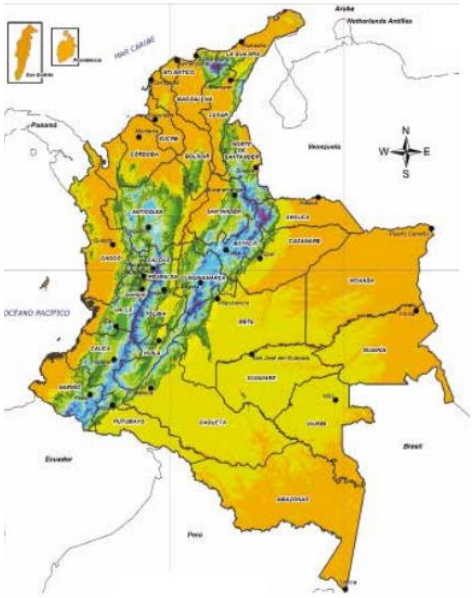
Fuente. IDEAM, 2015.

Los escenarios no son predicciones ni recomendaciones políticas, su alcance está en la amplia gama de posibilidades que ofrece a la investigación sobre cómo puede que desarrollen el clima en un futuro bajo la suposición de condiciones socioeconómicas, tecnológicas y biofísicas. Por lo cual, de cara a estos el IDEAM infiere un aumento en temperatura que puede ser de 2,4°C para el final de siglo XXI, evidenciados en lugares como Arauca, Vichada, Vaupés y Norte de Santander. Aunque como se resalta a lo largo de esta recopilación de información, esto podría afectar en mayor medida a unas regiones y a otras no tanto, sobre todo en cuando se dé la ocurrencia de un fenómeno de variabilidad interanual.

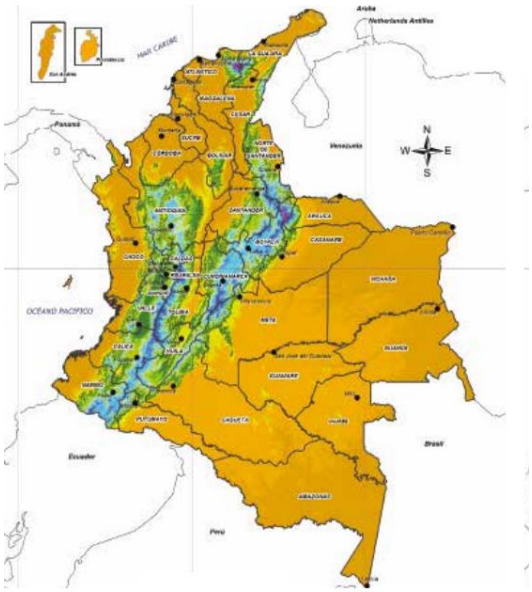
No obstante, estos aumentos de temperatura pueden traer impactos severos en el aumento del nivel del mar, retroceso de glaciares, afectaciones en paramos que alteraría el ciclo hídrico y los caudales en las cuencas como erosión y desertificación que debilitaría el suelo. Por otro lado, para el mismo periodo de tiempo se espera un aumento de lluvias entre el 10% al 30% en cerca del 14% del territorio, en departamentos como Nariño, Cauca, Huila, Tolima, Eje Cafetero, occidente de Antioquia, norte de Cundinamarca, Bogotá y centro de Boyacá. Estos incrementos pueden generar daños e impactos en la infraestructura tanto urbana como rural debido a deslizamiento e inundaciones.

Figura 2. Evolución de la temperatura media para los periodos 2011 - 2040, 2041 – 2070 y 2071 -2100 con respecto a la temperatura media de 1976 - 2005.

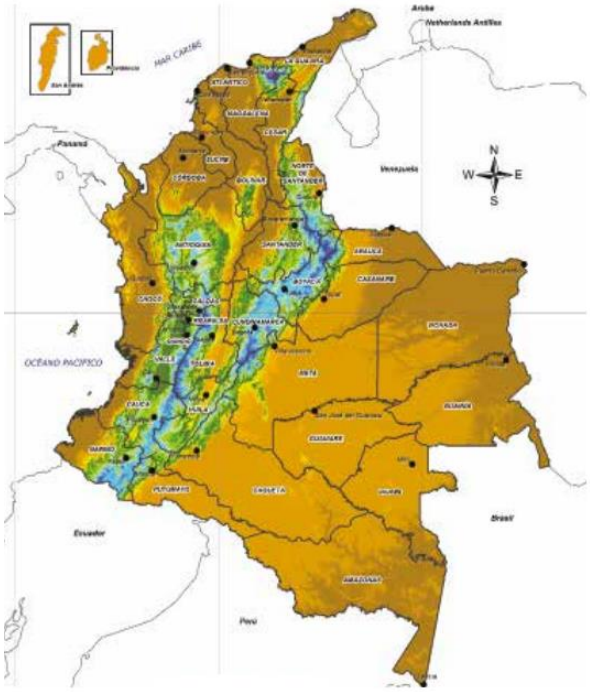
Fuente. IDEAM, 2015.



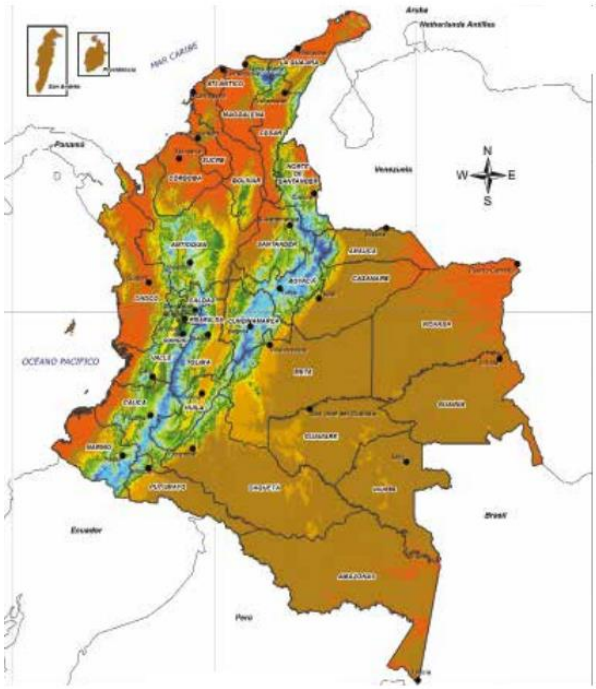
Temperatura media anual de referencia Periodo 1976-2005



Temperatura media anual para el Ensamble Multiescenario Periodo 2011-2040



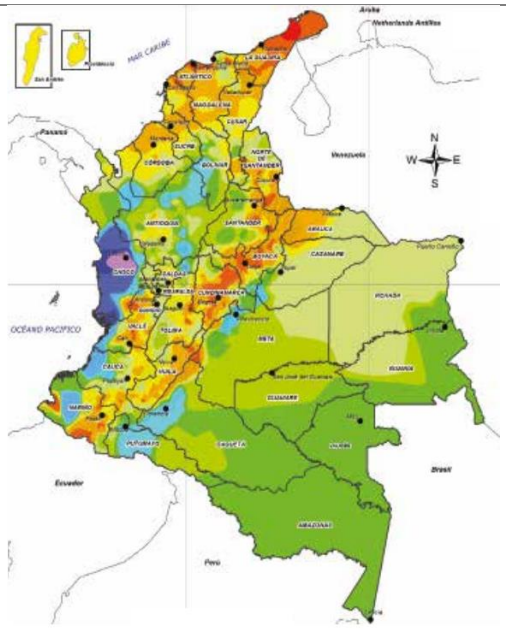
Temperatura media anual para el Ensamble Multiescenario Periodo 2041-2070



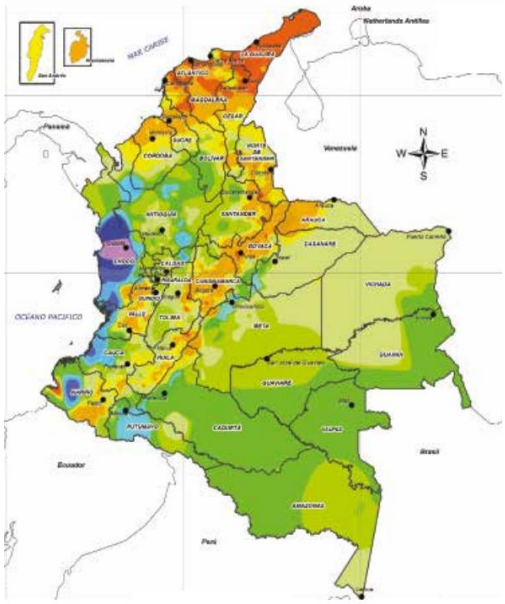
Temperatura media anual para el Ensamble Multiescenario Periodo 2071-2100

Figura 3. Evolución de la precipitación media para los periodos 2011 - 2040, 2041 – 2070 y 2071 -2100 con respecto a la precipitación media de 1976 - 2005.

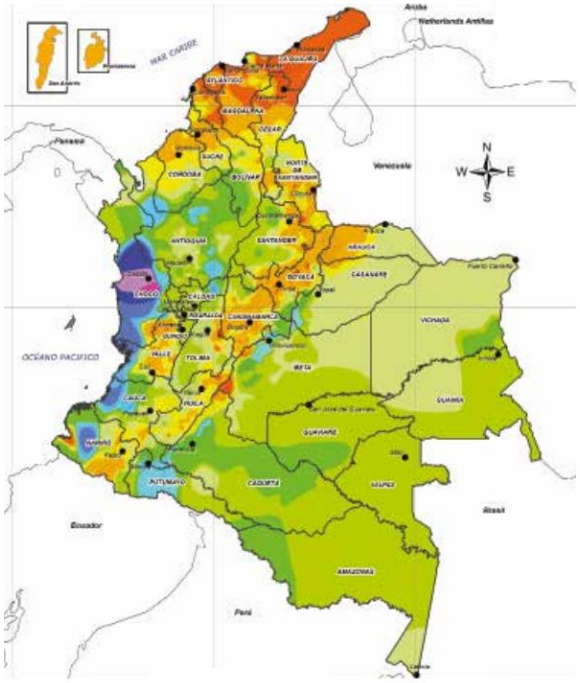
Fuente. IDEAM, 2015.

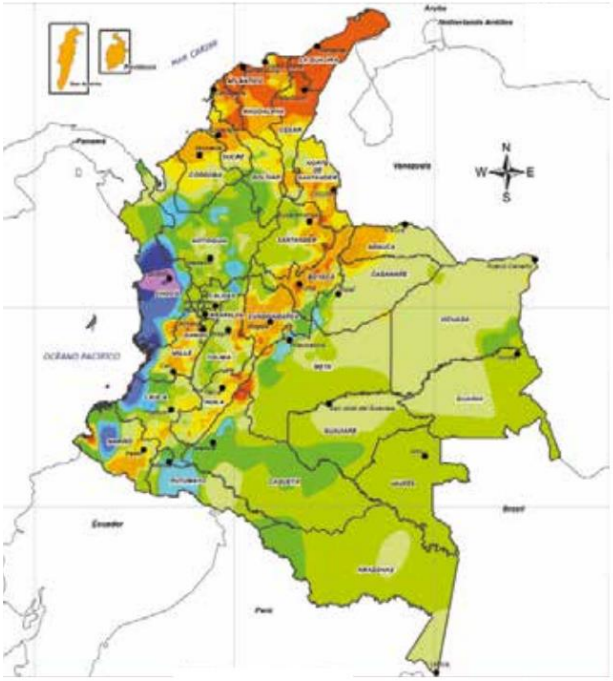


Precipitación media anual de referencia Periodo 1976-2005



Precipitación media anual para el Ensamble Multiescenario Periodo 2011-2040





Precipitación media anual para el Ensamble Multiescenario Periodo 2041-2070	Precipitación media anual para el Ensamble Multiescenario Periodo 2071-2100

Según el Banco Mundial (2023) en su informe de rendimiento, sumados al aumento de temperaturas la expectativa que se tiene sobre la tendencia el clima tiende a traer también la posibilidad de una mayor frecuencia de eventos meteorológicos extremos, como se ha evidenciado en los históricos actuales. De su investigación realizada en el informe "*Emergency Room Admissions Attributed to Extreme Temperatures in Colombia and Their Associated Cost*" un aumento en temperaturas, al igual que en la cantidad de días calurosos es posible, sobre todo teniendo como base que la década más cálida según la organización meteorológica mundial (WMO, 2023). Asi mismo, también aumentarían los días de precipitaciones intensas de 21,21 a 21,44, acompañado con variaciones en el ciclo hídrico en cuencas y zonas costeras, que bajo los actuales escenarios también dejan evidencia de un aumento del nivel del mar de 26cm (RCP 2,6) – a 29cm (RCP 8,5).

9.1.2. Variables climáticas que mayor impacto tienen sobre la infraestructura:

9.1.2.1. Precipitación:

Según la FHWA (2018) los impactos más significativos en la infraestructura de transporte son debidos a la intensificación de las precipitaciones, que pueden generar inundaciones, eventos de remoción en masa, avenidas torrenciales o picos extremos en los caudales que afecten la infraestructura en la zona por eventos intensos o constantes. La Unidad Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres (UNGRD) en su informe Evaluación de daños, perdidas e impactos por Fenómeno de la Lluvia (2023) indica que las perdidas por las intensas precipitaciones tras el triple evento que presenció el país fueron de $527.270,8 millones en daños, y $282.409,5 millones en pérdidas siendo la red primaria vial la más afectada.

TIPO INFRAESTRUCTURA	VALORACIÓN DAÑOS MILLONES $	%	NO. INFRAESTRUCTURA AFECTADA
Vías primarias INVIAS	$ 290.342,5	55,1%	3.908 km afectados 3.236 eventos
Vías primarias Concesionadas - ANI	$ 10.638,5	2,0%	12 corredores afectados 1.474 eventos
Puentes red primaria INVIAS	$ 105.989,5	20,1%	48 puentes afectados
Vías Terciarias - INVIAS	$ 71.609,2	13,6%	26 tramos viales
Vías férreas – ANI	$ 42.057,0	8,0%	4 tramos, 16 puntos afectados
Infraestructura Aeroportuaria	$ 6.634,2	1,3%	9 aeropuertos
TOTALES	**$ 527.270,8**	**100%**	

Figura 4. Resumen de Daños por tipo de Infraestructura tras el fenómeno de la Niña 2020-2023.

Fuente. DNP, INVIAS, 2023

El instituto Nacional de Vías (INVIAS) Reportó la afectación de 3908 km, con 3236 eventos que dieron paso a 585 cierres totales en vías, y la afectación de 48 puentes en 17 departamentos, siendo los Nariño, Huila, Boyacá, Risaralda, Caldas, Cauca, Choco y Santander en los que se presentaron el mayor número de eventos. A su vez, en la red vial terciaria se reportaron 337 eventos en vías cuyos daños corresponden $71.609, 2 millones.

La información anteriormente registrada es solo una muestra del último año de la ocurrencia de variabilidad climática de La Niña, sin embargo, dentro del informe de evaluación de daños perdidas e impactos asociados a la ocurrencia del Fenómeno de La Niña 2021 -2023 generado por el fondo nacional de adaptación y programa de las naciones Unidas para el desarrollo (2024) se contabilizan al menos 4710 eventos red no concesionada y red concesionada.

- *Región Andina:*
  La región se caracteriza por ser bimodal con dos temporadas de lluvia y dos temporadas secas, siendo las temporadas de invierno y verano. La región se caracteriza por tener una mayor diversidad pluviométrica con lluvias escasas para el sur de Huila y el nororiente del Tolima, a lo largo de la cordillera de 1000 a 1500 mm, de 2500- 3000mm en los valles de alto Magdalena y Cauca, y hasta 7000mm en las cuencas del Medio Magdalena y Medio Cauca (IDEAM, 2012).

  El comienzo del año suele tener bajas lluvias en la región a lo largo de la Cordillera Oriental, y en los valles de alto Magdalena y Alto Cauca (500-750mm), y mientras en las cuencas del medio Cauca y Medio Magdalena llegan a los 1250mm; para el segundo trimestre del año suele haber un aumento en precipitaciones 500mm a 1000mm, pero suelen ser bajas a lo largo de la cordillera oriental, en tanto que las mayores son en las cuencas del medio Cauca y Medio Magdalena. Sobre los meses de Julio-agosto, las precipitaciones en la región pueden ser de 0 – 1000mm, con las mayores precipitaciones ubicándose en las cuecas del medio Cauca y Magdalena, pero tiene un tiempo más seco sobre la cordillera. Sobre el trimestre de noviembre se evidencia una gran variedad de lluvias que suelen prevalecer hasta diciembre donde estas se hacen menos marcadas (IDEAM, 2014).

- *Región Caribe:*
  Caracterizada principalmente por las interacciones Océano-Atmosfera la región caribe es mayormente modal (cuasi modal), con una época seca y una lluviosa pero afectada por el tránsito de la Vaguada Monzónica/ La zona de confluencia intertropical (ZCIT), los frentes fríos y ondas tropicales, sin embargo, las precipitaciones pueden variar levemente de en inicio y finalización a lo largo de su territorio. La Época Seca va de diciembre a abril, y en ausencia de las estructuras anteriormente mencionadas las precipitaciones son bajas oscilando entre los 26,7 mm y 73,5 mm, aunque hacia el sur de la región se evidencia mayores precipitaciones con la entrada del mes de abril y su trimestre, en cuanto a los archipiélagos se evidencian lluvias frecuentes de diciembre a enero (IDEAM, 2014).

  Tras el paso de la estación seca se ve un aumento de la humedad de mayo a junio que refiere el DIMAR (2022)[9] – Dirección general Marítima – como una época de transición, de la región es en la Guajira donde se sigo experimentando el mayor tiempo seco. Sin embargo, las lluvias comienzan a presentarse sobre el mes de Julio donde la actividad de la vaguada Monzónica y el ramal atlántico de la ZCIT junto a una mayor cantidad de ondas tropicales y el pico de la temporada ciclónica aumentan el régimen de lluvias con precipitaciones de 350mm en el golfo de Urabá y 200mm en los archipiélagos, que podrían a estar entre los 500-4000mm hacía el sur de la región. (IDEAM, 2012).

- *Región Pacífica:*
  La región con los máximos anuales registrados de más de 9000mm, sin embargo, se presentan una amplia variación en razón propia de la geografía y topografía de la zona por lo que podría rondar entre los 3000mm y los 9000mm. La tendencia en precipitaciones no está muy definida (IDEAM, 2012). Durante el primer trimestre del año suele tener precipitaciones de hasta 1500-1750mm, comportamiento que se evidencia de igual manera a lo largo de la costa. Con la entrada del mes de abril, la región se convierte en una de las más lluviosas, con precipitaciones de hasta 2750mm hasta el mes de agosto, donde se va perdiendo la intensidad que es solo notable para el Choco y sur de Nariño. Para noviembre, se mantiene intensidad solo a lo largo

de la costa, y aunque sigue siendo una región particularmente lluviosa, se mantiene el núcleo marcado solo en el Choco con 1750mm.

- *Región Orinoquía:*
  Posee una mayor predominancia por altas lluvias de 2000-3000mm en el centro y oriente, y en le piedemonte puede llegar a los 7000mm, aunque sobre Arauca puede llegar a ser de 1500mm. La zona se caracteriza por ser monomodal, con una temporada seca y una lluviosa (IDEAM, 2012). Para el primer trimestre del año la Orinoquía presenta máximo de 750-1500mm, donde los primeros meses puede precipitar poco, y se mantiene con un promedio de 1200-1500mm hasta entrado el mes de Julio donde pueden registrarse bajas lluvias que se intensifican en el trimestre correspondiente sobre el piedemonte llanero y caen a 750mm en el resto de la región; mientras que para el trimestre final suele ser el más seco de la región, con lluvias oscilando entre 0-500mm (IDEAM, 2014).

- *Región Amazonía:*
  Se pueden presentar de 4000mm a 5000mm de lluvia anuales, al igual que la Orinoquía, es monomodal (IDEAM, 2012). Para los primeros meses se ve régimen pluviométrico de entre 1000-1500mm, aunque la mayor parte de la región suele estar en 1250mm que se mantienen hasta julio, donde las lluvias se reducen, aunque el régimen de 1250 se mantiene en el piedemonte amazónico. Con la entrada del mes de septiembre, las precipitaciones se reducen a un promedio de 500-1000mm, que durante los meses de octubre a diciembre mantiene este patrón.

Si bien bajo condiciones normales según el IDEAM (2013), el territorio en general tiene la probabilidad de 30% a 40% de un aumento de lluvias, frente a condiciones de variabilidad climática como La Niña la probabilidad de precipitaciones está entre el 60% y 70% de excedencia, especialmente para las regiones Andina y Pacífica en los últimos trimestres; y para las regiones de Caribe, Orinoquía y Amazonía las probabilidades de que las precipitaciones sean inferiores a la normal son del 60% en los últimos y primeros trimestres. Por el Contrario, frente a la ocurrencia de El Niño la probabilidad de disminución de las lluvias es del 90% en las regiones del Caribe y Andina durante los primeros y últimos meses. Mientras que para los meses de junio a octubre en las que se presentarían lluvias bajas serían las regiones Caribe, Andina y pacifica con una tendencia a la normalidad en la amazonia y la Orinoquia.

Dentro de un análisis de anomalías que se entregó para los periodos del 2021-2023, se evidencia una tendencia de aumentos en precipitaciones para parte de las regiones Andina, Caribe y Pacífica, donde se destacan excesos del 30% al 50%, teniendo mayores acumulados en los departamentos del Cauca, Nariño, Tolima, Huila, Valle, Quindío, Cundinamarca, Antioquia, Sucre, Bolívar, Atlántico, Magdalena y la Guajira, donde se registraron valores del 70%. Cabe resaltar que el 20% de excesos es un valor importante para el territorio según el IDEAM, además en el mismo informe se destaca que aproximadamente el 80% recibió cantidades superiores a los 3000 milímetros durante los 18 meses de análisis.

Este fenómeno de La Niña se extendió hasta febrero del 2023, posicionándose anómalamente como un triple evento como lo indica los Boletines del IMMAP (2023)[8] - *Information Management and Mine Action Program* – sin embargo, este fue uno de los años donde mayor temperatura a nivel mundial se presentó según indica el IPCC, determinadas por el desarrollo de El Niño, para Colombia las altas temperaturas se presentaron sobre el máximo en la mayor parte del territorio y solo en dos municipios se registraron valores

mínimos, destacándose las regiones de la Orinoquia y el sur de la región Caribe, y que generó un inicio bastante seco para el 2024 con una escasez de lluvias en las regiones pacifica, caribe y andina, aunque su efecto se sintió en todo el país.

Bajo las proyecciones generadas a partir del quinto informe (AR5) de la IPCC para el 2071-2011, se proyectan aumentos en las precipitaciones entre el 10% a 30% en el 14% del territorio, departamentos como Nariño, Cauca, Huila, Tolima, Eje Cafetero, Occidente de Antioquía, Norte de Cundinamarca, Bogotá y centro de Boyacá se verían afectados. Por otro lado, existirá una reducción en lluvias en la del 10% al 30% en las zonas de Amazonas, Vaupés, Sur del Caquetá, San Andrés y Providencia, Bolívar, Magdalena y Sucre (IDEAM, 2015).

9.1.2.2. Fenómenos de origen Natural que afectan la infraestructura debido a las precipitaciones:

En base a la información descrita anteriormente, se identifican los fenómenos de origen natural asociados a las precipitaciones que afectan la infraestructura vial:

9.1.2.2.1. **Inundaciones:** Según el IDIGER, las inundaciones se producen por el exceso de agua que invade las zonas que normalmente deben estar secas y pueden ser por inundación o encharcamiento. El factor más común por el cual se presenta la amenaza son eventos de precipitación intensa y/o frecuente debido a la variabilidad climática y el cambio climático sumados al manejo no regulado de cuencas y cambio de usos de suelo.

Se resalta que las inundaciones son el fenómeno que mayor ocurrencia tiene, sobre todo bajo influencia de la Niña, al corte del 2023 representa el 35% de emergencias atendidas con 11251 casos registrados desde 1950. Los departamentos que mayor amenaza registran Valle del Cauca (997), Antioquia (966) y Cundinamarca (871) y según el IDEAM periódicamente 10,2 millones de hectáreas son inundables, y cuando se presenta el fenómeno de la Niña se suman 900 mil hectáreas adicionales en el territorio nacional.

Figura 5. Número de Eventos de Inundación registrados en los 10 departamentos más afectados en los meses aparición de La Niña periodo 1950 - 2023.

Fuente: UNGRD, 2024.

Para el mes de mayo del 2024, la sala de crisis UNGRD informó que se presentaron 101 eventos de inundaciones en el país con la mayor afectación en el departamento de Cundinamarca, para un total de 255 eventos registrados al cierre de la temporada de lluvias. La distribución geográfica de las zonas inundables en el país puede observarse en el siguiente mapa:

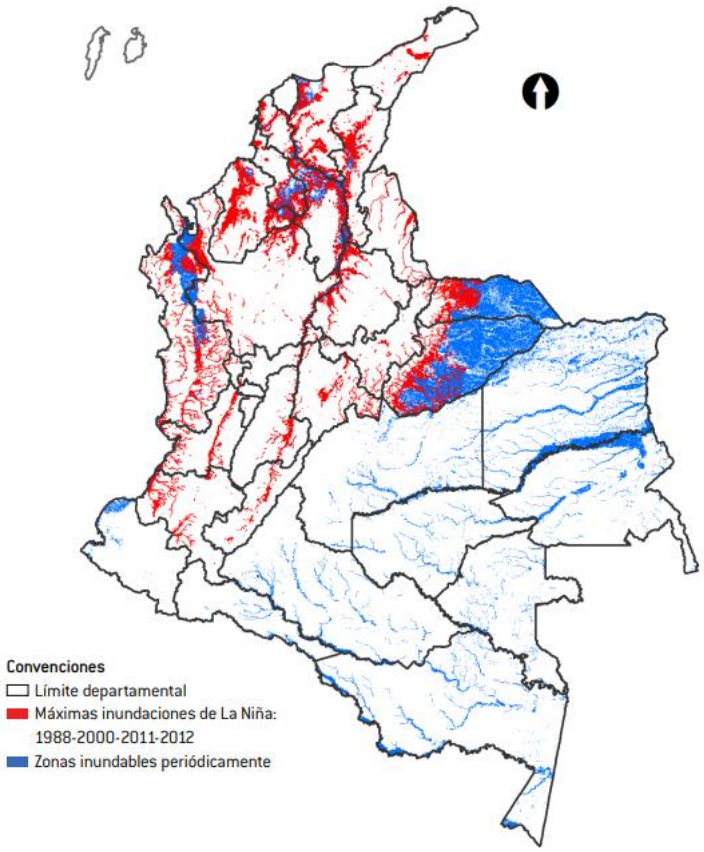


Figura 6. Mapa de susceptibilidad para eventos de Inundación.

Fuente: DNP, 2018

La Unidad nacional de Gestión de Riesgo en base a información de IDEAM (2018), indico que al menos 190.935Km^2 son zonas susceptibles a inundación, es decir que al menos el 17% el territorio nacional tiene condiciones favorables, resaltando algunas cuencas como Magdalena- Cauca y el Caribe que han sufrido transformaciones antropomórficas, como cambios de usos de suelos. Como una herramienta, para entender y señalar zonas potencialmente inundables, el SIAC e IDEAM tienen disponibles en sus páginas mapas de zonificación por amenaza de inundación.

Dentro de información obtenida de INVIAS, se encuentra que de enero – Octubre del 2023, se reportaron 9 eventos de inundación donde 8 causaron el cierre total de la vía, y 1 un cierre parcial. Siendo Cauca y Santander los departamentos mayormente afectados.

En el caso particular de Santander, se reportaron dos cierres para el cruce de la ruta 45A San Gil -Onzaga (INVIAS, 2023) por eventos de inundación entre el 2 de abril, y el 24 de abril de 2023. Evaluando las estaciones pluviométricas del Aserrio (24030850) y la Fuente (24050100) se registraron entre 150 – 300 mm de lluvia, siendo uno de los meses con mayores precipitaciones en el año. Haciendo un comparativo, el régimen de lluvia para el departamento oscila entre los 1500 – 2000 mm, con 167 días de lluvia por estación y una precipitación media mensual de 167mm/mes, lo que evidencia que sobre el promedio mensual las lluvias registradas en las estaciones reportan un exceso del al menos un 30%.

De acuerdo con la corporación autónoma regional de Santander (2024) en referencia a la ocurrencia de La Niña, para la región Andina se evidenció un exceso de 10% a 20% en las precipitaciones durante ese periodo. El cual fue el menor acumulado dentro de los tres años que duró el evento de La Niña.

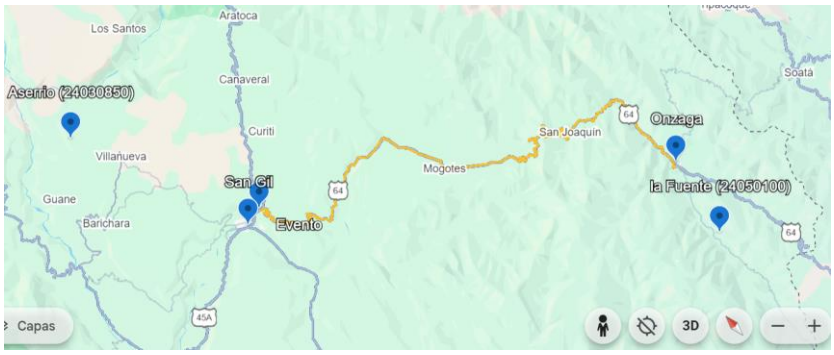


Figura 7. Posicionamiento Emergencia vial Ruta 45A San Gil -Onzaga.

Fuente: Google Earth.

9.1.2.2.2. **Movimientos en masa:** La Unidad Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres (2018), define el evento como el desplazamiento de suelo, roca y/o tierra ladera abajo por acción de la fuerza de gravedad, conocidos también como deslizamientos, derrumbes, movimientos de remoción en masa. Su ocurrencia puede estar sujeta a factores como cobertura vegetal, pendiente, características del material, lluvia, actividad tectónica y factores antropogénicos, aunque para el territorio nacional el principal detonante son las precipitaciones intensas o constantes pero moderadas.

Según el banco mundial (2017) los eventos de remoción en masa se presentan principalmente en la región Andina y los departamentos de Antioquia (1085), Cundinamarca (924) y Nariño (867) es donde más eventos registran según el UNGRD (2024). De 1950 a 2023 se han registrado 8174 eventos de movimientos en masa.

Figura 8. Número de Eventos de movimientos en masa registrados en los 10 departamentos más afectados en los meses con Aparición de La Niña periodo 1950 - 2023.

Fuente: UNGRD, 2024.

En estas consideraciones, el IDEAM (2024) en su último boletín caracteriza 20 departamentos con alta probabilidad de amenaza, frente al aumento de precipitaciones esperados por el inicio del fenómeno de la Niña para el año en curso. Tan solo para la primera temporada de lluvias del año la Unidad Nacional de Gestión de Riesgos ha atendido 700 eventos, de los cuales 275 son eventos de movimiento en masa. A continuación, se presenta el mapa de susceptibilidad de eventos de movimiento en masa para el país:

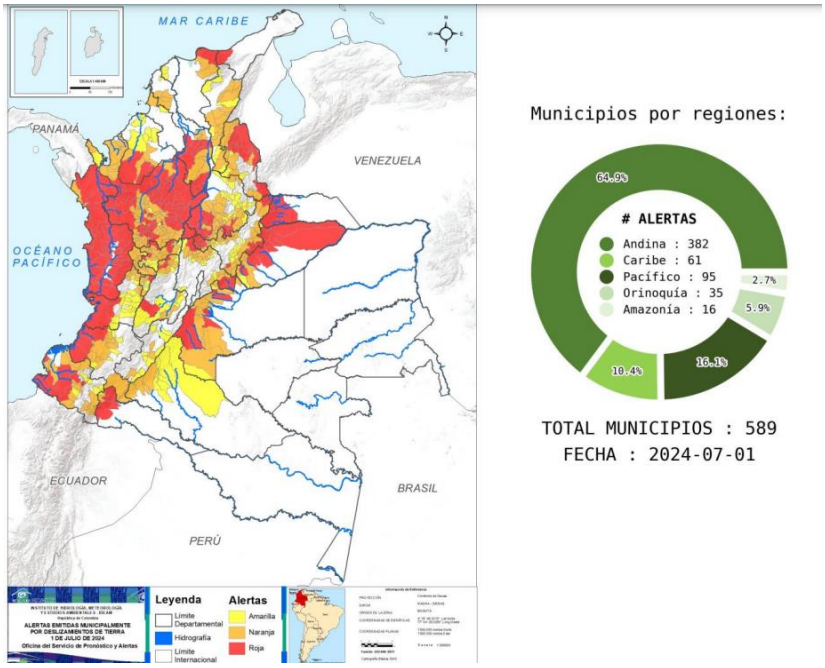


Figura 9. Pronostico por deslizamiento de tierra por regiones; Boletín 0549.

Fuente: IDEAM, 2024.

A través de una zonificación realizada por el Servicio Geológico Colombiano se ha logrado identificar las zonas más susceptibles a movimientos en masa, encontrando que el 50% pertenece a una zona de amenaza baja, 22% de amenaza media y 4% de amenaza alta; estas zonas de amenaza alta se encuentran principalmente ubicadas en las cordilleras, en las laderas del rio Cauca y Patía, en la Sierra Nevada de Santa Marta, en los Macizos de Quetame y Santander (SGC, 2023). El SGC también posee una herramienta que permite consultar movimiento de tierra en el país, SIMMA, la cual genera un informe sobre movimientos en masa por departamento o municipio.

De acuerdo con información extraída del repositorio de emergencias viales del INVIAS (2023) Se reportaron 351 emergencias relacionadas a remoción o movimiento en masa de la cuales 152 generaron cierres parciales en vías, y 197 cierres totales durante los periodos del 1 de enero a 31 de octubre del 2023. De los eventos registrados para este periodo el departamento con mayores afectaciones fue Boyacá con 61 eventos, seguida de Santander con 38 eventos, y Nariño con 30 (Tabla 1).

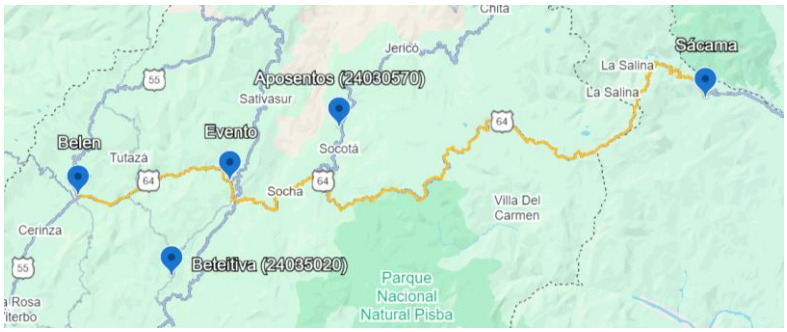


Figura 10. Posicionamiento Emergencia Vía Belén - Sácama (abril, 2023)

Fuente: Google Earth.

Como ejemplo, para abril la vía Belén – Sácama (K17+050) (Figura 9) presentó un cierre total por deslizamiento, y para el mismo año durante el mes de septiembre nuevamente presentó un cierre parcial por el mismo tipo de emergencia, revisando las precipitaciones para estos meses en dos estaciones cercanas: Aposentos (24030570) y Beteiva (24035020); se evidenció que durante el periodo marzo-abril se presentaron los más altos niveles de precipitaciones entre 140 -180 mm, mientras que para el mes de septiembre los niveles fueron de 30 -40 mm con un comportamiento de un promedio de 45mm muy parejo en los tres meses anteriores, lo que pudo haber generado en el suelo algunos procesos que afectaran la estabilidad del terreno. Así mismo, revisando las precipitaciones mensuales promedio para los municipios cercanos al lugar de la emergencia, se evidencia, que Paz de Rio y Belén tienen 84 y 85mm respectivamente. Registrando para abril casi el 70% de excedente.

Tabla 1. Eventos de Remoción en masa en carreteras registrados por el INVIAS, 2023.

Fuente: Propia.

Departamento	Caída de material	Delizamiento Complejo	Deslizamiento	Reptación	Total general
BOYACÁ	10		51		61
SANTANDER	12		26		38
NARIÑO	5		25		30
NORTE DE SANTANDER	14		16		30
CHOCÓ	3		23		26
CALDAS	1		24		25
HUILA	2		21		23
RISARALDA	6		15		21
CAUCA			18		18
PUTUMAYO	1		15		16
ANTIOQUIA	3	1	6	1	11
VALLE DEL CAUCA	2		8		10
CAQUETÁ	1		8		9
CASANARE	2		6		8
QUINDÍO	8				8
TOLIMA			5		5
SUCRE	3				3
CÓRDOBA	1		2		3
CESAR	1		1		2
CUNDINAMARCA			2		2
MAGDALENA			1		1
GUAJIRA	1				1
Total general	**76**	**1**	**273**	**1**	**351**

9.1.2.2.3. **Avenidas Torrenciales:** son crecidas repentinas producto de fuertes precipitaciones que generan aumentos rápidos en niveles de ríos y quebradas de alta pendiente, de acuerdo a las condiciones de la cuenca, estas pueden tener sedimentos o no, y debido a las características pueden causar daños a la infraestructura, y aunque en Colombia las emergencias generadas por este fenómeno han sido graves, son menos frecuentes que los movimientos de tierra, las inundaciones y vendavales (IDIGER, 2024).

Los departamentos de Antioquia (127), Cauca (78) y Valle del Cauca (73) son los que más emergencias han registrado en el periodo de 1950 a 2023 según el UNGRD, sin embargo, la mayor cantidad de personas afectadas las han tenidos los departamentos de Magdalena, Antioquia y Huila.

Figura 11. Número de Eventos de Avenidas torrenciales registrados en los 10 departamentos más afectados en los meses con aparición de La Niña periodo 1950 - 2023.

Fuente: UNGRD, 2024.

Según el Índice Municipal de Riesgo, las regiones que evidencian mayor riesgo de presentar el evento son la región pacifica, la región Andina al norte y entre la cordillera Oriental, y los piedemonte llanero y amazónico con 12,4 millones de hectáreas que pueden presentar avenidas torrenciales. Para la primera temporada de lluvias del 2024 se han presentado 9 avenidas torrenciales reportadas por la unidad nacional de gestión de riesgos. El siguiente mapa presenta la zonificación del país respecto a la susceptibilidad frente a eventos de avenidas torrenciales (Figura 11):

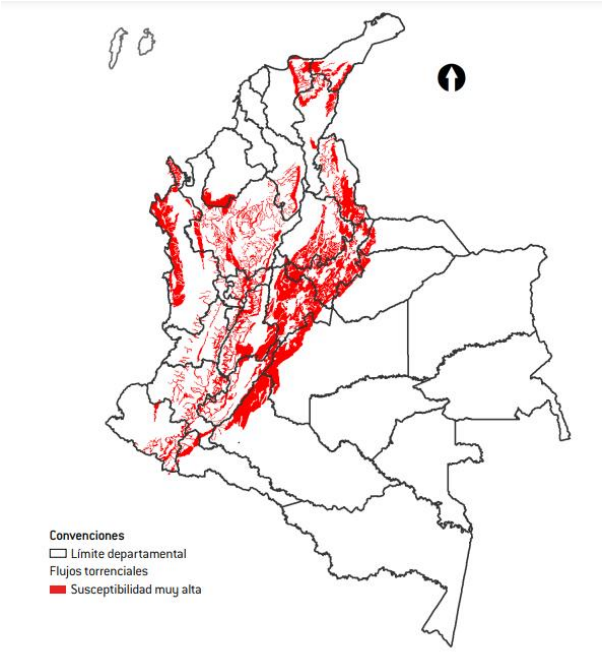


Figura 12. Mapa de susceptibilidad para eventos de Flujo/Avenidas Torrenciales.

Fuente: DNP, 2018.

De los fenómenos anteriormente mencionados es uno de los que menos se presenta, sin embargo, según algunos estudios es más común de lo que se cree y su potencial destructivo es mucho mayor a la de las inundaciones debido a la confluencia del arrastre de sedimentos, y el flujo de agua (E. Vera & M. Valderrama). En muchos casos, las avenidas torrenciales también son tratada como un movimiento en masa, no obstante, para los fines de este estudio se investigó como un fenómeno independiente, teniendo en cuenta que a pesar de que su investigación es reducida, posee su propia zonificación y caracterización realizada por el UNGRD y el IDEAM, y también el Servicio Geológico Nacional ofrece información sobre el evento de manera aislada.

Dentro de la base de emergencias del INVIAS (2023) de los 416 eventos en este repositorio 19 eventos corresponden a emergencias por avenida Torrencial, donde 5 eventos produjeron el cierre parcial, y los 14 restantes generaron el cierre total de la vía. Siendo los departamentos de Santander, Boyacá y Norte de Santander los más afectados por este tipo de evento.

Para el 12 de noviembre en la Variante Sardinata ruta 70NSA, Norte de Santander, se da el cierre total de la vía por la afectación del estribo del puente del PR01+940 debido a que las fuertes lluvias en el sector provocaran una avenida torrencial en el sector de la San Juana. Analizando el registro pluviométrico en los días anteriores a la ocurrencia del evento, se evidencia que desde el 7 de noviembre en adelante las precipitaciones promedio fueron de 41,3mm siendo el 11 el día con el más alto registro, un 76,5mm que pudo haber sido el detonante del evento.

Figura 13. Posicionamiento Emergencia Bucarasica - Sardinata (noviembre, 2024).

Fuente: Google Earth.

Según la página Weather Spark, para Sardinata el mes con mayores precipitaciones es octubre con un promedio de 100 mm precipitados, sin embargo, de la estación Sardinata (16035030) se obtiene que para los meses octubre y noviembre del 2024, según la información descargada del DHIME (IDEAM) las precipitaciones fueron de 148,6 mm y 315,2 mm. Los excesos en estos dos meses pudieron modificar las condiciones en la cuenca y propiciar el evento de avenida torrencial.

9.1.3. Temperatura:

De acuerdo con el IPCC (2023) la temperatura mundial aumentó sobre un 1.1°C dentro del periodo de 2011- 2020, para Colombia la primera parte del año, con la posibilidad de que este aumento seguirá sucediendo, teniendo en cuenta las altas temperaturas experimentadas. Según El Tiempo (2024) para marzo se registró un aumento de entre 1°- 6°C a la máxima registrada para años pasados en varios departamentos del territorio, y con el aumento de emisiones de gases invernadero, los cambios de usos de suelo, entre otros, se prevé que esta seguirá en aumento. Dentro del sector transporte esto puede significar un aumento en el número de días con altas temperaturas y olas de calor, al igual que variaciones en el ciclo hídrico como la evaporación, además de secar el suelo haciéndolo más susceptible a erosión y degradación en pavimento (FHWA, 2018), además también exacerba los incendios forestales que pueden generar cierres viales importantes por falta de visibilidad.

La distribución del comportamiento de las temperaturas en el país varía por regiones. Las características principales del comportamiento de cada región se presentan a continuación:

- *Región Caribe:*
  Durante los primeros cinco meses exhibe temperaturas promedio de 3 a 23°C, mientras que para la zona de los archipiélagos y en cercanías a la sierra Nevada de Santa Marta puede ser mayor de 24°C. De junio a noviembre, la temperatura media aumenta a 28°C, excepto las cercanías a la sierra Nevada donde la máxima temperatura es de 23°C mientras que en los archipiélagos se mantiene en 24°C. La tendencia a los 28°C se mantiene casi hasta al final del año, sin embargo, puede bordear los 24°C, al igual que en los archipiélagos. (IDEAM, 2014)
- *Región Andina:*
  Debido a la constitución de los pisos térmicos dentro de la región, la zona presenta temperaturas de 24°C o más en los valles de las cuencas de los ríos Magdalena, Cauca, Patía y Sogamoso; mientras que, en los altiplanos de Cundinamarca, Boyacá, Nariño, la zona Montañosa de Centro Antioquía, Cauca y Caldas las

temperaturas pueden rozar los 3°C- 20°C y en la zona de alta mañana mantiene un promedio de 6°C (IDEAM, 2014). La temperatura suele mantenerse a lo largo del año, aunque cerca a los altiplanos puede estar entre 12°C- 20°C.

- *Región Pacífica:*
  De enero-junio según el IDEAM (2014). las temperaturas están en un promedio de 18°C-25°C con las menores temperaturas en las llanuras costeras y las mayores sobre el resto de la región; para el mes de agosto las temperaturas se posicionan en gran parte de la región sobre los 25°C siendo o mayores, para que entrados los meses de noviembre -diciembre la temperatura sobre la llanura costera regrese a los 18°C-24°C (IDEAM, 2014).

- *Región Orinoquía:*
  Durante la primera parte del año tiene temperaturas promedio de 24°C gracias a su baja accidentalidad geográfica (IDEAM, 2014).

- *Región Amazónica:*
  La zona mantiene una distribución muy homogénea con temperaturas de 24°C-28°C, en cuanto al piedemonte las temperaturas suelen ser más bajas sobre los 20°C; sin embargo, para el trimestre de octubre la temperatura comienza a bajar en la región posicionándose de manera uniforme a menos de 24°C (IDEAM, 2014).

  Bajo condiciones de El Niño las temperaturas y el tiempo tiende a ser más seco en las regiones Caribe, centro Andina, en el norte del pacifico, y en la Orinoquía y Amazonía. Como evidencia se tiene el episodio del niño registrado 2023-2024 donde la zona Caribe alcanzó los 40°C y ciudades principales como Bogotá, Medellín y Cali registraron temperaturas de 20°C a 35°C posicionándose como las temperaturas más altas en los últimos años, y que, aunque posiciona el fenómeno como uno moderado no fue tan crudo como los episodios 1992-1993, 1997-1998 y 2015-2016 si ha traído notables consecuencias al país (UNAL, 2023). Asi mismo, el IPCC bajo los escenarios de emisiones proyectados (2071-2100) para su quinto informe indica que pueden generarse aumentos de en la temperatura que podría ser de 2,6°C y afectar principalmente a Arauca, Vichada, Vaupés y Norte de Santander (IDEAM, 2015).

9.1.4. Fenómenos de origen Natural que afectan la infraestructura debido al aumento de la temperatura:

En base a la información descrita anteriormente, se identifican los fenómenos de origen natural asociados al aumento de la temperatura que afectan la infraestructura vial:

9.1.4.1. **Sequías/incendio forestal:** De acuerdo con el UNGRD (2017) la sequía es un periodo donde se da falta o escasez total de disponibilidad hídrica en comparación con los niveles habituales, y persiste el tiempo suficiente para causar problemas ambientales, económicos y/o sociales, esta puede ser estacional y estar definida dentro los regímenes de temperatura de la zona, pero puede verse afectada por efectos de variabilidad climática o efectos del cambio climático donde se dé una deficiencia en precipitaciones que pueda generar déficits en cuencas hídricas a su vez. Estos periodos con altas temperaturas y pocas lluvias generalmente elevan la tasa de evaporación y secan los suelos de manera tal que incrementa la erosión y

facilitan el debilitamiento de las capas de tierra, además de contribuir a la degradación del pavimento y hacer que los incendios forestales sean más frecuentes generando la afectación de caminos con el cierre de carreteras debido a la baja visibilidad (FHWA, 2018) Según el Desiventar desde 1921 a 2020 los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Tolima y Huila son los que mayor número de incendios forestales han tenido con 7908, 4107, 3052 y 2345 respectivamente, y para 2023 se registraron más de 2000 incendios (UNAD, 2024).

Revisando la información en La unidad de gestión de riesgo en el periodo de 1914 a 2021, los departamentos más susceptibles frente al evento son Boyacá, Santander y Cundinamarca con 72, 60 y 54 emergencias atendidas durante el periodo mencionado cuando se está en presencia del Niño (UNGRD, 2021), sin embargo, bajo la información pronosticada las mayores afectaciones pueden darse en la región Caribe, Región Pacífica y la Región Andina haciendo susceptibles a estas regiones a los eventos de sequía e incendios forestales.

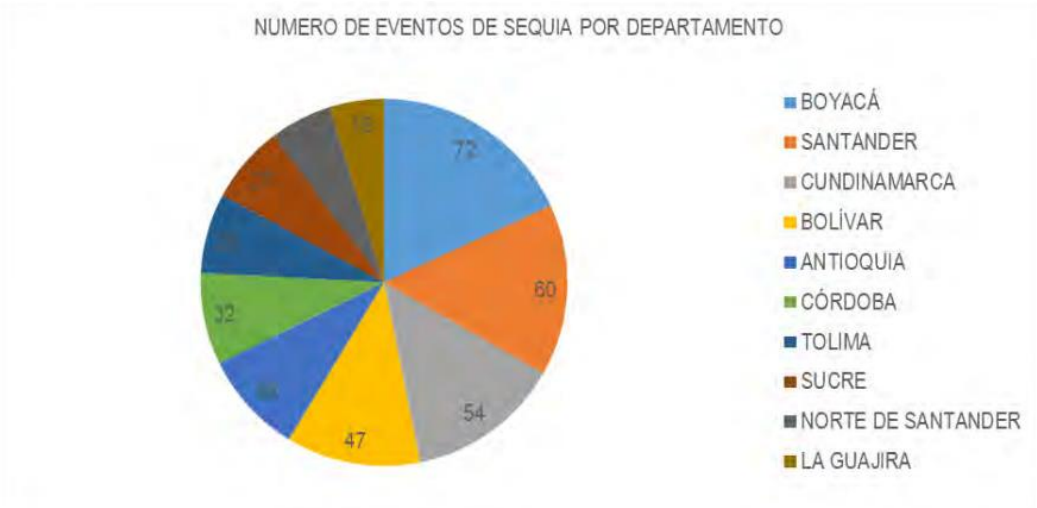


Figura 14. Número de Eventos de Sequías registrados en los 10 departamentos más afectados en los meses con aparición del Niño periodo 1914 - 2021.

Fuente: UNGRD, 2022.

A continuación, se muestra un mapa de susceptibilidad por eventos de sequía e incendios forestales en el País:

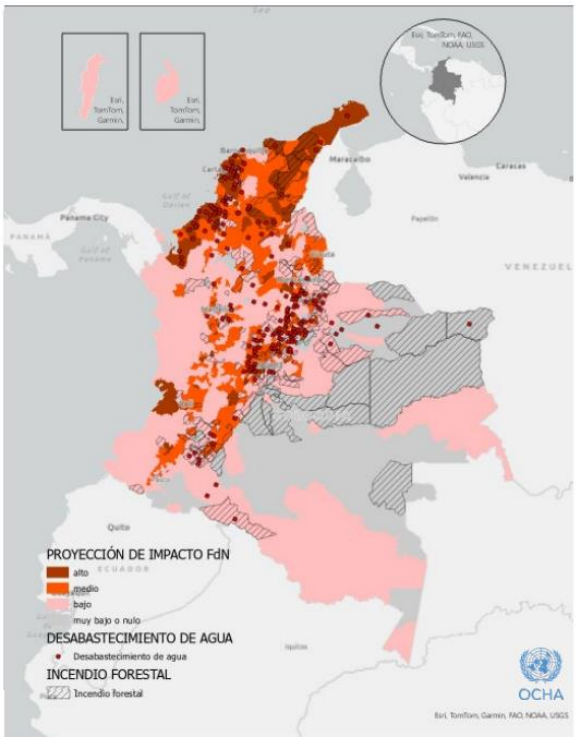


Figura 15. Mapa de susceptibilidad a eventos de Sequías por la aparición de fenómeno del Niño

Fuente: OCHA, 2023

9.1.4.2. Aumentos de temperatura (Olas de Calor):

Dentro de las proyecciones para el país referentes al cambio climático, al temperatura es una variable que a lo largo de los años está destinado a aumentar y a recrudecerse en la medida que un fenómeno de variabilidad climática se presente como sucedió en 1997 – 1998 y 2006 – 2010 con efectos moderados sobre la población; Y aunque, los cambios de temperatura no tienen efectos tan marcados como las precipitaciones o las variaciones en el nivel del mar, si generan cambios sobre la mecánica de suelos y el entorno.

Si bien se pudiese considerar que la vegetación no representa una estructura importante, su deterioro o existencia podría generar modificaciones en la estabilidad de taludes, sumado a fenómenos de expansión y contracción por la pérdida de humedad sobre el suelo debido a las altas temperaturas, que debilitadas pueden convertirse en una amenaza en combinación con otros factores como las lluvias o entradas de la temporada de invernal (J. Frías, 2016).

Así mismo, la erosión generada en cuencas y la disminución de los caudales puede facilitar o propiciar otros eventos de amenaza como deslizamientos, además el cambio de curso de ríos, esto generando que en cuanto condiciones frías aparezcan pueda inundar zonas que antes no registraban dentro de la base de datos por inundaciones.

9.1.4.3. Variaciones en el Nivel del Mar y Marejada Ciclónica:

Según el ICF – International Climate fund – del Reino Unido, durante el siglo XX el mar se ha elevado un promedio de 170mm, de acuerdo con los escenarios climáticos globales que entrega el IPCC – Panel intergubernamental de Expertos en el clima – En el último reporte, podría darse un aumento de 0,60-1 m en el nivel del mar esto en consideración al calentamiento global, los cambios en el régimen de oleaje, pero en el escenario más catastrófico correspondiente a la trayectoria de concentración representativa (RCP 8,5 w/m^2) la variación está en 2m. Aunque el cambio parezca paulatino, la realidad es que el movimiento de las aguas igualmente genera sedimentación y puede ocasionar daños cuando su movimiento se dirige a tierra adentro, y según un reporte dado por el Espectador en el 2022 en los próximos 17 años Colombia podría perder 12630 hectáreas de tierra.

Además, si bien Colombia no está situado en la trayectoria general de Huracanes y tormentas o ciclones tropicales no son tan recurrentes dentro de las dinámicas oceánicas, existe la probabilidad de que estas mismas se vean afectadas por el cambio climático y el efecto de la variabilidad climática interanual de La Niña generando un cambio de patrones, por lo cual el IDEAM (2013), presentan probabilidades frente a la ocurrencia de un aumento de 12,8 cm en un periodo de retorno de 10 años, o de 15,7cm en un periodo de 50 años al menos una vez en este periodo, lo que sumado a precipitaciones fuertes y/o constantes, podría indicar el empuje de agua a tierra adentro generando inundaciones en la vías que son susceptibles a este tipo de evento generando el cierre por daños o por perdida de la estructura (DNP, 2015).

Para el año 2024, el DIMAR (Dirección general marítima) y CIOH (Centro de investigaciones hidrológicas) enviaron una alerta para el mar Caribe por el alto oleaje presentado para el mes de enero para las jurisdicciones de Puerto Bolívar, Riohacha, Santa Marta, Barranquilla, Cartagena, Coveñas, Turbo, San Andrés y Providencia. Según indica el medio Infobae (2024, enero 24) se registraron alturas entre 2,5 a 3,8 metros, por un cambio en las condiciones meteomarinas y un aumento en la velocidad de vientos como comunicaron las entidades encargadas.

Dos días después de ser emitida esta alerta, San Andrés declaró calamidad pública luego de la vía principal de la isla perdiera por hundimiento casi la totalidad de la banca a causa de la socavación generada por el alto oleaje registrado. Aunque este fue el daño más grave que llevó al cierre total de la Circunvalar de San Andrés, se registran que las condiciones climáticas han afectado otras secciones de la ruta donde se comenzaron a evidenciar agrietamientos (Infobae, 2024).

Según (J. Plaza et al, 2011) el oleaje promedio de la isla es de 0,30 – 0,60 m, olas de baja altura con altas frecuencias, para el momento en el que se dio el evento de emergencia, el DIMAR advertía de condiciones adversas además de que estaba en desarrollo condiciones climáticas dadas por el fenómeno de El Niño, lo cual implicaba un pronóstico de un oleaje de más altura. Sin embargo, contrario a lo que se pensaría de su relación con temporadas o ciclos secos, la dinámica meteomarina también depende de la formación de ciclones, fenómenos de variabilidad climática, huracanes y el cambio climático, los cuales pueden modificar dichas dinámicas. Un ejemplo de esto es que si bien para el último semestre del año 2024 se emite otra alerta (Infobae, septiembre 24) para el mar Caribe debido a la influencia de un ciclón tropical que generó un incremento en la nubosidad, lluvias, descargas eléctricas y vientos moderados, además de un oleaje de entre 1,2 – 1,4 m, el cual en la revisión de la página de CIOH (13 diciembre 2024) indica pronósticos para altura de oleaje 1,8 -2,2 m, además de condiciones húmedas como lluvias ligeras y nubes parciales.

9.2. CAPITULO 2: TIPOS DE ACTIVOS TIPICOS DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL Y SUS CARACTERISTICAS:

En esta relación la parte de infraestructura también tiene una importancia igual de alta que la comprensión de los fenómenos climáticos bajo los cuales se ve impactado. Para entender la afectación de los sistemas viales bajo el efecto de un fenómeno natural, es importante el conocimiento de los activos o componentes que le integran. Así pues, este capítulo busca hacer una recopilación de la infraestructura típica que compone el sistema vial y sus componentes según la norma colombiana, esto con el fin de poder evidenciar cuáles serán las afectaciones que presentara bajo diferentes eventos de amenaza (Ver Matriz 2 tabla 7 capítulo 3).

9.2.1. Puentes y pontones:

Estructura de drenaje requerida para atravesar a desnivel un accidente geográfico u obstáculo artificial, que no permite el paso del tránsito en dirección de su eje. Si el puente tiene una luz entre apoyos menor o igual a 10 metros, se considera pontón, si es superior es un puente (INVIAS, 2018).

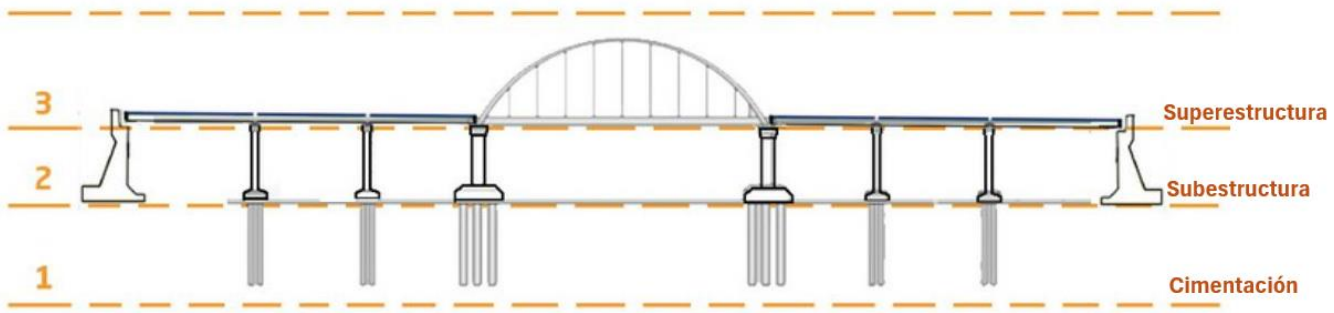


Figura 16. Estructura de puente o pontón.

Fuente: A. Erzilla, ULMA, 2024.

Los diferentes subcomponentes que conforman un puente se listan y definen en la siguiente tabla:

Tabla 2. Componentes estructurales de un puente o pontón.

Nivel/Activo Especifico	Componentes	Definición
Superestructura	Estructura Portante	Componente estructural que soporta al tablero y trasmite cargas procedentes del tablero a los estribos o Pilas. Esta puede variar dependiendo del tipo de puente, para los puentes atirantados o colgantes los tirantes o cables de acero serán la estructura portante; en puentes en arco el arco, las péndolas y conectores; y en un puente de viga será la viga longitudinal componen la estructura portante. ***Materiales usuales:*** Concreto y/o acero.
	Tablero	Estructura que soporta las cargas donde reposa la superficie de rodamiento. ***Material usual***: Concreto y acero.

	Viga	Se encargan de sostener el tablero y también transmiten cargas, se sitúan sobre los estribos y las pilas a lo largo de todo el puente para soportar su carga. Pueden ser de hormigón, acero y placas armadas. ***Material usual:*** concreto fundidas in situ o prefabricadas.
	Losa	Sostiene la superficie de rodadura y recibe también la carga de vehículos y transmitir de manera transversal, a su vez se empotra las cabezas de las vigas y las arriostras en el plano horizontal. ***Material usual:*** concreto fundidas in situ o prefabricadas.
	Diafragma	Son estructuras que hacen posible la resistencia a las deformaciones transversales del puente, incrementan la distribución de las cargas a todas las vigas y estabilizan la construcción, suele ser del mismo material que el de las vigas, y se ajustan de manera perpendicular a las vigas. ***Material usual:*** concreto fundidas in situ o prefabricadas.
	Superficie de rodadura/ Calzada	Se sitúa sobre el tablero y es la estructura que se expone de manera directa con la acción de los neumáticos de los vehículos, y hace posible la circulación segura y cómoda. Esta debe cumplir con las condiciones necesarias para garantizar las condiciones de seguridad vial. ***Material usual:*** Concreto hidráulico o Pavimento asfáltico.
	Pretiles o Barreras de Seguridad	Son elementos estructurales situados longitudinalmente a los bordes del tablero que actúan como barrera de contención para la seguridad vial de los vehículos que transitan en el puente. ***Material usual:*** Concreto prefabricado o Acero.
	Losa de aproximación	Es una estructura que ofrece una transición gradual entre el tablero y la carretera, y se construye en el trasdós del estribo para ofrecer una conducción más confortable y segura. ***Material usual:*** Concreto reforzado.
Subestructura	Estribos	Son elementos estructurales de retención que soportan la carga vertical de superestructura del puente en los extremos y están compuestos por una losa de fundación que transmite el peso del suelo. En construcción también se completan los estribos con elementos denominados aletas su función consiste en servir de sustentación al tablero y como muros de contención unidos al talud tanto al inicio como al final del puente. ***Material usual:*** Concreto reforzado.
	Pilas	Son los apoyos de la superestructura y transfieren la carga del tablero a la cimentación/fundación, su diseño permite la resistir las fuerzas verticales, horizontales y transversales. Pueden ser hormigón o acero macizado con hormigón, y dependiendo de la técnica constructiva podría ser de sección constante o variable, maciza o hueca. ***Material usual:*** Hormigón o mampostería.
	Pilono o pilón	Usadas en puentes colgantes o atirantados, son estructuras que sobrepasan en altura vertical al tablero que sirven para la sujeción y anclaje de los cables de acero o tirantes. ***Material Usual:*** hormigón.
Cimentación	Zapatas	Elementos de cimentación superficial que transmiten los esfuerzos que llegan a través de la subestructura apoyándola y anclándola. ***Material usual:*** Concreto reforzado.
	Pilotes	Elementos de cimentación Profunda que transmiten los esfuerzos que llegan a través de la subestructura apoyándola y anclándola. ***Material usual:*** Concreto reforzado.

Nota: información adaptada del Manual de drenaje para Carreteras, INVIAS, 2019; Estructura de un puente: todo lo que debes saber, Termiser, 2015.

9.2.2. Obras de drenaje:

9.2.2.1. Disipadores de Energía: Estructuras diseñadas para disipar la energía cinética en el flujo, con el fin de que se evite la socavación en un canal aguas abajo. Según el manual de obras de drenajes del INVIAS (2009) estas se construyen en concreto, ladrillo o arcilla vitrificada según la velocidad máxima permisible, aunque estudios actuales han sugerido más materiales como caucho de neumático (Ayala, Franco et al, 2018).

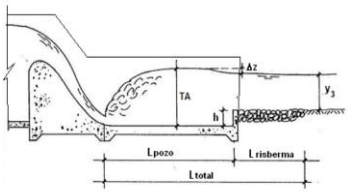
- Rápidas lisas: se componen de una estructura de entrada o transición entre la cuneta o alcantarilla y el canal, es decir la rápida y estructura de disipación con las cuales se buscan minimizar perdidas y evitar ondas cruzadas y otras turbulencias, se recomienda usar ángulos de 12,5° en la entrada y salida del canal (INVIAS, 2009).
- Rápidas escalonadas: usadas cuando el flujo de agua se transporta de un nivel superior a uno inferior, la disipación de energía se da en cada escalón y la eficiencia está dada por la altura del escalón y el número de escalones (INVIAS, 2009).
- Rápidas y escalonadas: se trata de estructuras que incluyen en cada cierto tramo una rápida escalonada u otro elemento disipador (INVIAS, 2009).
- Canales de rápidas con tapa y Columpio: son estructuras de disipación de fondo liso para terrenos de alta pendiente en un canal de rápidas y lisas que se interrumpen en terrazas de talud tratado o cada cierto tramo, y el columpio es el que deflecta el chorro a una tapa existente obligando al flujo a volver al canal (F. Mejía, 2010).
- Canales con pantallas deflectoras: son estructuras de disipación de fondo liso que incluye pantallas deflectoras alternas colocadas a 45° con el eje del canal, y pestañas longitudinales sobre los bordes de las paredes que impiden el rebose (F. Mejía, 2010).
- Vertederos de caída libre: Dique o pared que presenta una sección de forma rectangular, aunque esta puede cambiar, a través de la cual se mueve una corriente liquida en caída libre a una altura determinada (Universidad Nacional de Colombia, 2016).
- Pozos de Amortiguación: Estructura diseñada para contener el salto hidráulico, de manera que el vertedero sea el salto, el pozo o estanque soportara la solicitación del salto garantizando que se logre la máxima eficiencia posible por parte del disipador, pero además de que se genere dentro de ella (R. Pardo, 2018).

Figura 17. Canal de Rápidas lisas. Fuente: S. Villamarin, 2013.	*Figura 18. Canal de rápidas y escalonadas. Fuente: M. Mejía, 2010.*	*Figura 19. Canales de rápidas con tapa y columpio. Fuente: Universidad Libre de Colombia, 2013.*

Figura 20. Estructura de disipación rápidas con pantalla deflectora. Fuente: S. Villamarin, 2013.

Figura 21. Estructura de disipación Vertedero. Fuente: Plazas y Acuña, 2018.

Figura 22. Pozo de Amortiguación. Fuente: R, Pardo, 2018.



9.2.2.2. *Cunetas:* Son estructuras que captan el agua de escorrentía superficial que viene de la plataforma vial y de los taludes de corte, y las conduce para disponer correctamente de las aguas. Estas también se construyen en terraplén para prevenir la erosión en bermas y taludes causada por las aguas lluvia las cuales se dirigen a cajas colectoras. La sección más recomendada es parabólica donde existe tránsito vial, aunque también se pueden diseñar rectangulares o triangulares (INVIAS, 2009).

Según especificaciones de la ANI y el INVIAS, el material de construcción común para cunetas en vías es concreto simple vaciadas in situ o prefabricadas, el refuerzo estructural dependerá de las condiciones del proyecto, y en todo caso se busca prevenir filtraciones, crecimiento vegetal, buscar eficiencia y reducir costos de mantenimiento.

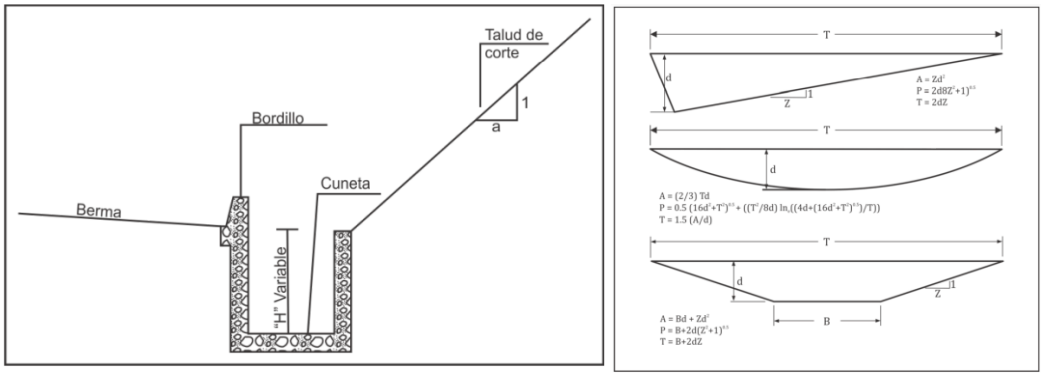


Figura 23. (1) Sección transversal de Cuneta con bordillo de seguridad; (2) secciones típicas de cuneta usadas en obras de drenaje, Colombia.

Fuente: INVIAS, 2009.

9.2.2.3. *Filtros:* elementos encargados de captar, controlar y evacuar aguas procedentes de la infiltración en pavimentos, afirmado o en terrenos subyacentes, e incluso por niveles freáticos altos *(*INVIAS, 2019)

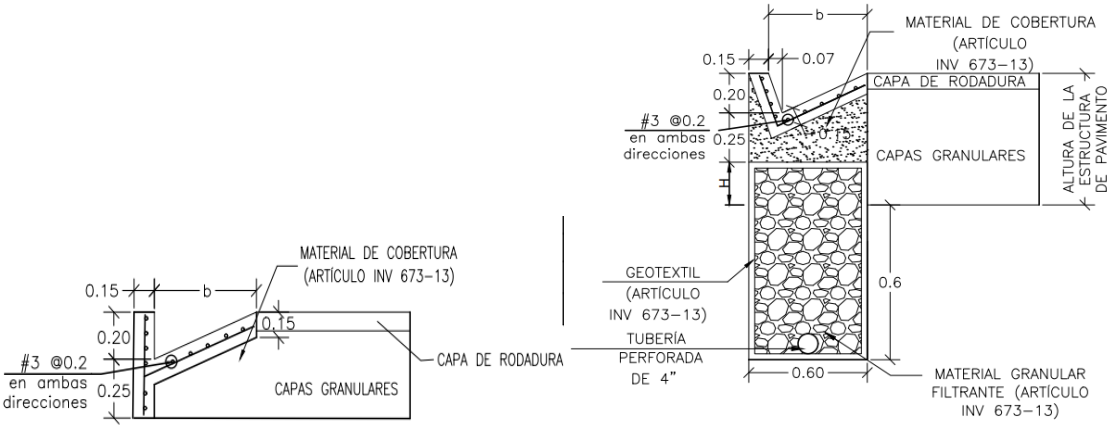


Figura 24. Detalle de sección Berma-Cuneta-Filtro en Talud de Lleno, (IZQ) y en Talud de Corte (DER).

Fuente: INVIAS, 2009.

9.2.2.4. *Zanjas de Coronación – Contracunetas:* Estructuras diseñadas para captar las aguas de escorrentía de la parte alta del talud corte o en proximidades de un terraplén, esto con el fin de evitar su paso por el talud, y descargarlas en bajantes o alivios para su disposición. El material debe ser impermeabilizado o impermeable, y la sección generalmente es rectangular, aunque también puede ser trapezoidal (INVIAS, 2009).

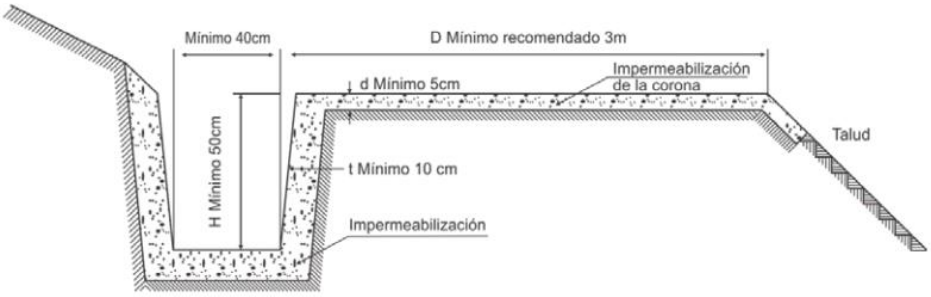


Figura 25. Sección transversal de zanja de coronación.

Fuente: INVIAS, 2009.

9.2.2.5. *Bajantes o alivios:* Según el INVIAS (2009) son estructuras que reciben las aguas de las zanjas de coronación que no se pueden entregar a cauces naturales o de cunetas de Terraplén, y las conducen por el talud hacia la parte inferior, generalmente estas se construyen con alguna estructura de disipación de energía y previene la erosión en terrenos de alta pendiente.

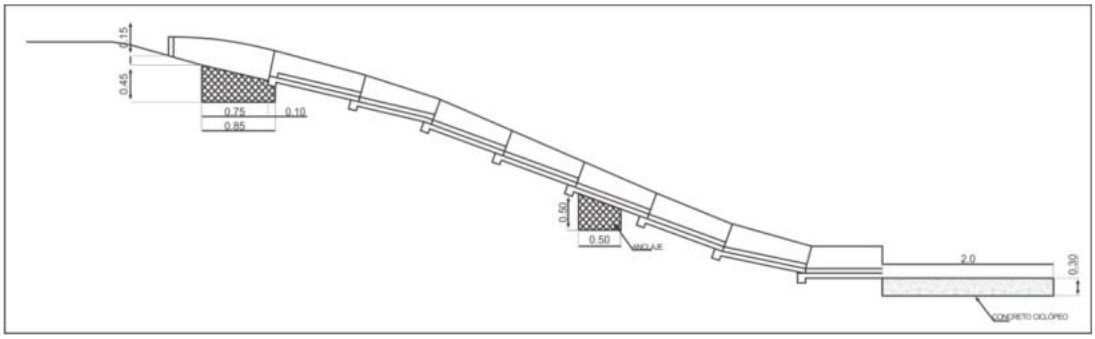


Figura 26.Bajantes o alivios sobre talud.

Fuente: INVIAS, 2009.

9.2.2.6. *Pocetas o Cajas Colectoras:* estructuras de drenaje que da entrada a las aguas recolectadas en cunetas, bajantes o filtros permitiendo el cruce bajo vía para disponer en alcantarillas sin que se generen impactos o socavación, o al menos minimizándolos. Además, también brinda estabilidad y confinan la vía al actuar como contrapeso ante posibles fuerzas de supresión (INVIAS, 2009).

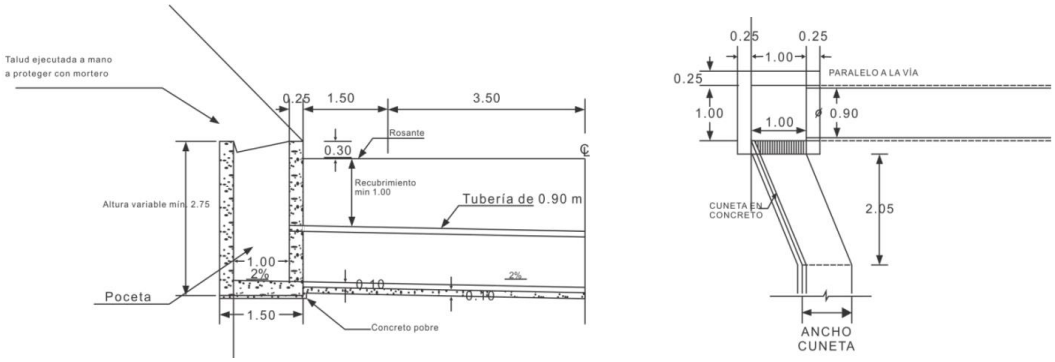


Figura 27. (1) Sección transversal de caja colectora; (2) Unión cuneta y caja colectora o poceta.

Fuente: INVIAS, 2009.

9.2.2.7. *Alcantarilla:* es una estructura compuesta por un conducto por la cual se cruza el agua colectada por debajo de la vía de un lado a otro, proyectados en cruces de corrientes para desaguar pocetas, cajas colectoras, zanjas de coronación, cunetas o filtros en puntos bajos para permitir el flujo de agua. Según el INVIAS la sección puede ser circular o pueden alcantarillas de cajón (INVIAS, 2009). El material usado comúnmente en construcción es concreto reforzado, en tuberías de PVC o acero, o alcantarillas de cajón en concreto reforzado.

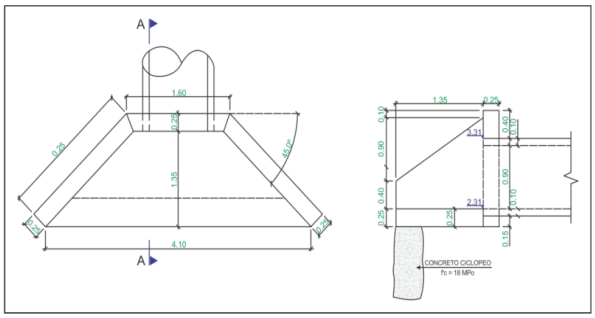


Figura 28. (1) Sección transversal de terminal de una alcantarilla Fuente: INVIAS, 2009.

Figura 29. Imagen de construcción de terminal de alcantarilla. Fuente: Periódico la voz de la región, https://lavozdelaregion.co/millonaria-inversion-para-ejecutar-obras-viales-en-veredas-de-altamira/, 2022.

La estructura de entrada en función del sistema de drenaje se desarrolla en la poceta o caja colectora, en cuanto a la estructura de salida o terminal, está compuesta por los muros de las aletas que retienen el material del terraplén y la protege de la erosión además de brindarle estabilidad; las aletas, que guían el flujo de agua; y las placas de solera, la cual protegen la tubería de la erosión y contrarrestan las fuerzas de subpresión.

9.2.2.8. Box Culvert (Coulvert): son elementos diseñados para la conducción de fluidos, también se destaca por su uso como puentes de corta luz, túneles de servicio y transporte de materiales, entre otros. Aunque su construcción en un principio fue desarrollada para el paso de aguas, también ha tomado usos como canal de aguas, túnel, puente, contendor de taludes, paso vehicular y pasos de fauna (K, Santamaria, 2022).

Son elementos versátiles, fáciles y rápidos de instalar, además de que su sección puede cambiar de acuerdo con el tipo o necesidad, al igual que sus dimensiones y en muchos casos ya viene prefabricado. Los principales elementos que describen un Box Culvert se listan y describen en la siguiente tabla, y un esquema típico se muestra en la figura:

Tabla 3. Componentes estructurales de un Box Culvert.

Nivel/Activo Especifico	Componentes	Definición
Superestructura	Muros laterales	Funcionan como columna de soporte y muros de contención de frente al terraplén de aproximación, están unidos a la placa superior y se soportan de una fundación superficial.
	Placa Superior	Cumple con la función de soportar el paso de vehículos y peatones, recibe su carga viva, y la carga muerta de andenes, barandas y peso propio
	Aletas	Estructuras adicionales que funcionan como muros de contención para el terraplén de aproximación y proporcionan protección contra la erosión
	Juntas o Uniones	Elementos que permiten el acople entre las partes del cajón
	Guarda rueda	Consiste en la superficie por donde transitaran los vehículos y se construye generalmente con pendiente de bombeo para que la inclinación pueda conducir las aguas al sistema de drenaje. Puede ser en pavimento o en concreto.
Cimentación	Placa inferior - Cimentación	Cimentación superficial diseñada para soportar las cargas vivas y muertas que recibe de la superestructura, presiones hidrostáticas y del suelo.

Nota: información adaptada del Manual de drenaje para Carreteras, INVIAS, 2019; J. Charfuelan, 2005.

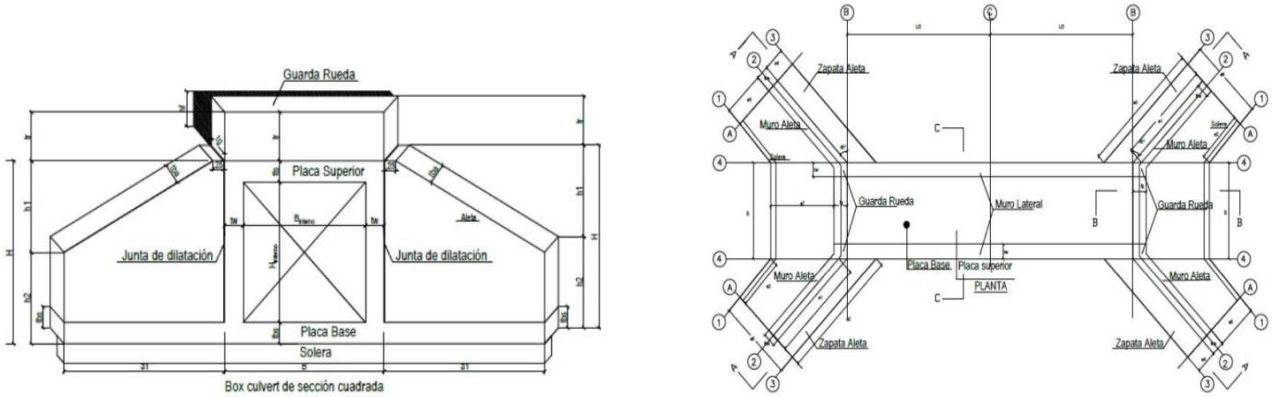


Figura 30. (1) vista de frente de Box Culvert sección cuadrada (2) Vista en planta de Box Culvert.

Fuente: INVIAS, MINTRASNPORTE, 2017.

9.2.3. Estructura de rodamiento:

Los pavimentos son estructuras constituidas por capas superpuestas sobre terreno compactado y diseñadas en base métodos, normas y especificaciones técnicas apropiados, a fin de obtener una superficie que tenga la rigidez y durabilidad necesarias para el tránsito de vehículos.

Su diseño debe garantizar la resistencia a fenómenos climáticos, además de asegurar homogeneidad en la superficie para que ofrezca comodidad en el tránsito.

9.2.3.1. Pavimento flexible: Es una estructura formada por varias capas (Subrasante, subbase, base y la carpeta asfáltica) capaz de trasferir las cargas desde la primera capa al suelo, y se colocan en orden descendente siendo la primera capa la que mayor capacidad portante tiene, dependiendo del espesor de la primera capa existe una capa intermedia entre la capa de rodadura y la base (G. Martinez,2020). Los principales componentes de un pavimento flexible se presentan en la siguiente figura y en la tabla se listan y describen:

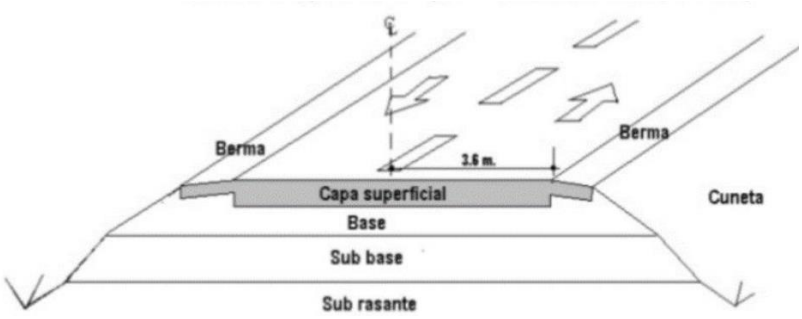


Figura 31. Estructura típica de un pavimento asfaltico (Flexible).

Fuente: G. Martínez, Ingeniería & Construcción, 2020.

Tabla 4. Componentes estructurales un pavimento flexible.

Componentes	Definición
Carpeta asfáltica	Compuesta de materiales asfalticos y pétreos, esta capa es la que recibe directamente las cargas vehiculares y efectos ambientales como lluvia y radiación solar. Además, la superficie deber garantizar la rugosidad, durabilidad y la distribución de carga.
Base	Base granular bajo la carpeta, de característica friccionantes y capaz de garantizar estabilidad, además de transmitir las cargas de la carpeta a la siguiente capa, sus materiales deben ser permeables para que el agua fluya y no se estanque para deteriorar la estructura.
Subbase	Capa granular de menor calidad sobre la subrasante y bajo la base, capaz de generar estabilidad y distribuir cargas al suelo adyacente contribuyendo a que se mantenga la forma e integridad de la carretera, además debe servir como barrera para prevenir que la humedad ascienda y debilite la estructura.
Subrasante	Superficie que soporta el pavimento, compuesto por el terreno natural, aunque en ocasiones se mejora sus características por medio de compactación.

9.2.3.2. Pavimento Rígido: Es una estructura formada por varias capas (Subrasante, subbase y una capa de concreto – losa -) capaz de trasferir las cargas desde la primera capa al suelo, la resistencia estructural dependerá de la losa de concreto, y dependiendo de la capacidad de soporte de la subrasante puede

considerarse el uso de la subbase (G. Martinez,2020), o estabilizarse la subbase con asfalto o cemento, para evitar que el agua que se infiltre entre juntas pueda remover material fino y causar daños a la estructura (M. García, 2002). Los principales componentes de un pavimento rígido se presentan en la siguiente figura y en la tabla se listan y describen:

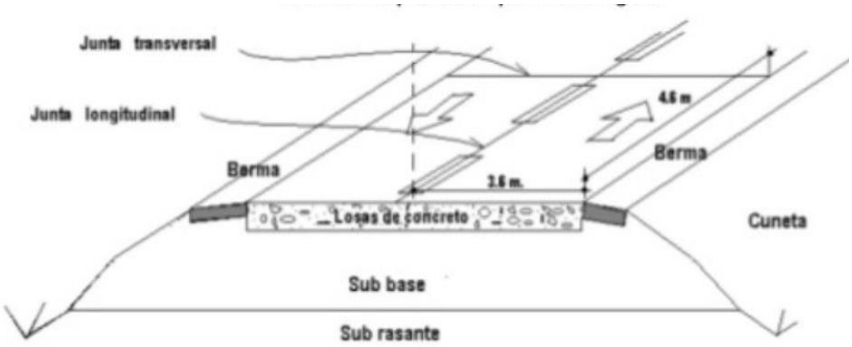


Figura 32. Estructura típica de un pavimento rígido (Concreto).

Fuente: G. Martínez, Ingeniería & Construcción, 2020.

Tabla 5. Componentes estructurales un pavimento Rígido.

Componentes	Definición
Losa de Concreto	capa superior del pavimento construida en concreto hidráulico la cual recibe directamente las cargas vehiculares trasmitiéndolas a las Subrasante, además recibe el impacto de los fenómenos ambientales. Las losas se unen por medio de barras de unión. Las cargas se distribuyen a losas adyacentes por medio de Juntas y pasadores.
Subbase	Capa granular capaz de generar estabilidad y distribuir cargas al suelo adyacente contribuyendo a que se mantenga la forma e integridad de la carretera, además debe servir como barrera para prevenir que la humedad ascienda y debilite la estructura.
Subrasante	Superficie que soporta el pavimento compuesto por el terreno natural diferente a material orgánico o con alto potencial expansivo, aunque en ocasiones se mejora sus características por medio de compactación.

9.2.3.3. Pavimento en Placa Huella: Sistema de pavimentación usado en vías de bajo volumen de tránsito, generalmente usado en vías terciarias donde el afirmado es insuficiente frente a las consideraciones climáticas propias del sector y consiste en pavimentar con concreto reforzado únicamente donde pasan las ruedas del vehículo, comportándose como un pavimento rígido, y donde el espacio restante de la superficie se compone de piedra pegada – ciclópeo – (Borrero y Jiménez, 2021). La figura siguiente presenta un esquema típico de placa huella:

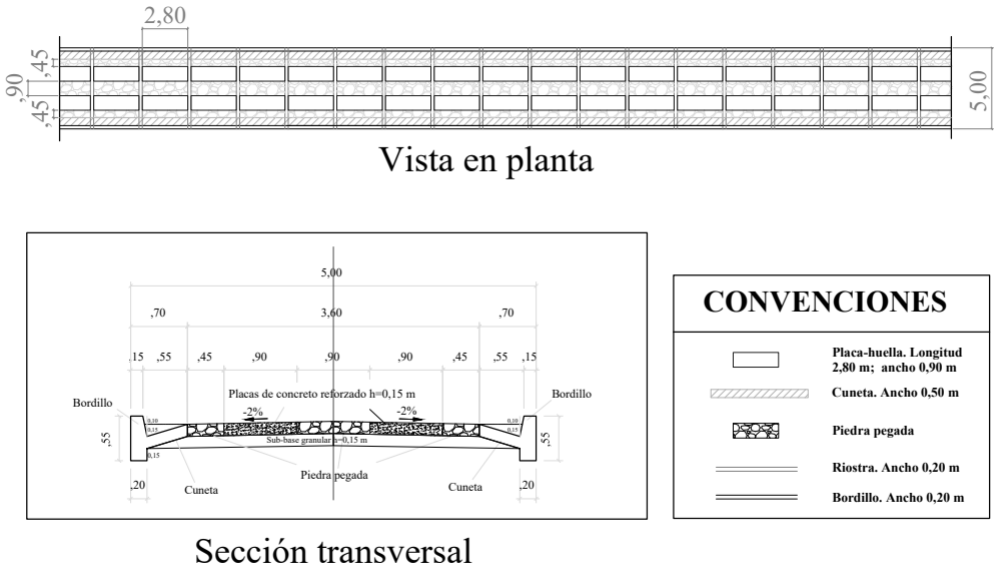


Figura 33.Sección en planta y transversal de un pavimento placa huella.

Fuente: INVIAS, 2017.

9.2.3.4. Pavimento semirrígido: Aunque su estructura es la misma que un pavimento flexible, la principal diferencia con respecto a los dos tipos anteriores es que una de sus capas esta rigidizada artificialmente con el uso de algún aditivo: asfalto, emulsión, cemento, cal y químicos. Dentro de estas estructuras los pavimentos constituidos por adoquín y placa huellas suelen ser categorizados.

9.2.3.5. Pavimento articulado: Compuesto por una capa de adoquines de concreto, una capa de base y una subbase si la anterior existiese, y una capa de subrasante tratada/compactada. Suele ser usada en vías de bajo a medio volumen de tráfico, aunque algunos estudios sugieren su aplicación en vías de alto volumen. Resulta una opción económica en costos de operación y mantenimiento, además de constructivos cuando el empleo de otros materiales resulta ser una complicación en el proyecto sea por su obtención o por la maquinaria por usar (X. Sánchez, 2003). A continuación, se presenta un esquema típico de un pavimento articulado y se listan y describen sus componentes:

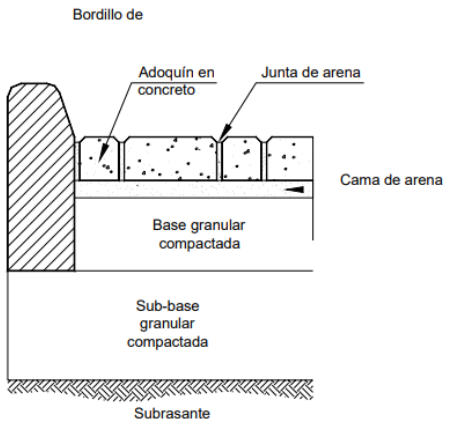


Figura 34.Corte transversal de pavimento articulado.

Fuente: X. Sánchez, Universidad de los Andes, 2003.

Tabla 6. Componentes estructurales un pavimento articulado.

Componentes	Definición
Adoquines en concreto	capa superior del pavimento construida con adoquines de concreto separados por juntas selladas con arena, este entrababiemiento generará que los elementos funcionen como una capa que resistirá las cargas del tráfico, el clima y el desgaste por el desplazamiento del tránsito.
base	Capa granular colocada debajo de una capa de arena donde se colocarán los adoquines, capaz de generar estabilidad y distribuir cargas al suelo adyacente contribuyendo a que se mantenga la forma e integridad de la carretera, dependiendo del volumen se puede emplear algún tratamiento.
Subrasante	Superficie que soporta el pavimento compuesto por el terreno natural diferente a material orgánico o con alto potencial expansivo, aunque en ocasiones se mejora sus características por medio de compactación. Si el volumen es alto, se emplea una subbase de material no tratado según los parámetros de diseño.

9.2.3.6. Afirmado: en INVIAS define el afirmado como una capa de material granular natural o procesado, de gradación especifica que soporta las cargas y esfuerzos del tránsito, con material fino cohesivo suficiente para mantener adherida todas las partículas. Además, su diseño debe contemplar la resistencia a la abrasión, el desprendimiento de partículas y el levantamiento de polvo. Su construcción se da en lugares donde el clima y la topografía no complica su construcción ni operación, y sobre todo para vías de bajo a medio volumen de tránsito.

9.2.4. Estructuras de Contención:

9.2.4.1. Diques de contención Estructuras diseñadas en piedra, tierra u hormigón para soportar las presiones de tierra por medio de su propio peso, su aplicación está enfocada en la retención de masas de

tierra, soporte a excavaciones, corrección de deslizamientos de tierra y rocas de poca altura debido a un suelo débil, y/o en suelos arcillosos o residuales. (INVIAS, 2006).

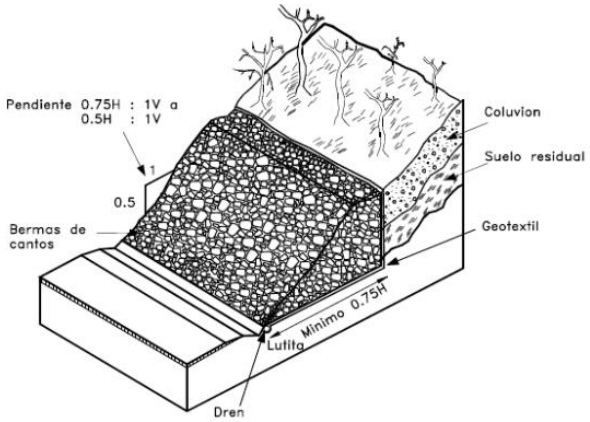


Figura 35.Muro de gravedad en roca.

Fuente: J. Suarez, Universidad Industrial de Santander. 1998.

9.2.4.2. Muros de Gaviones: estructuras de forma paralelepípedo en malla de alambre que se llena con fragmentos de roca dura, que se comporta de manera flexible y suele soportar grandes deformaciones sin perder el revestimiento (INVIAS, 2006) razón por la cual se usan en la contención de deslizamientos rotacionales y traslacionales. Son efectivos en situaciones donde es importante el control de la erosión, y su diseño debe contemplarse junto con bermas y taludes.

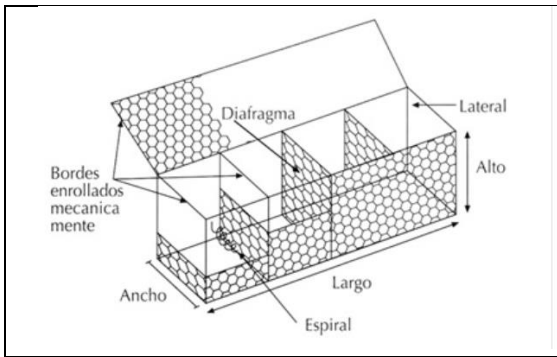


Figura 36. Gaviones Tipo caja.
Fuente: M. Pérez; Parque y grama:
https://www.parqueygrama.com/tipos-de-gaviones/; 2017.

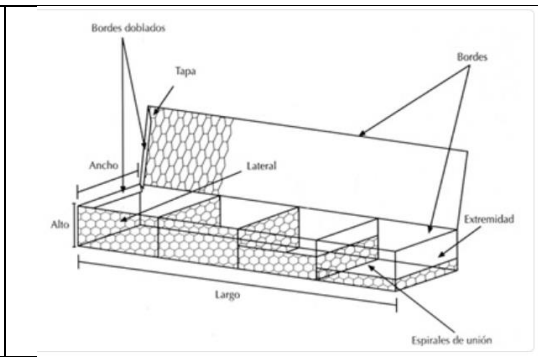


Figura 37. Gaviones tipo Colchón.
Fuente: M. Pérez; Parque y grama:
https://www.parqueygrama.com/tipos-de-gaviones/; 2017.

9.2.4.3. Muros de gravedad en concreto: Muros de masa relativamente grande en concreto o concreto con piedra, que trabaja como estructura rígida. Actúan como estructuras de peso o gravedad, no recomendadas para ser construidas a más de 6 metros debido al aumento de generación de flexión y costos que no pueden se resistidos por el material. Su construcción debe contemplar drenaje para eliminar la posibilidad de presiones de agua (INVIAS, 2006).

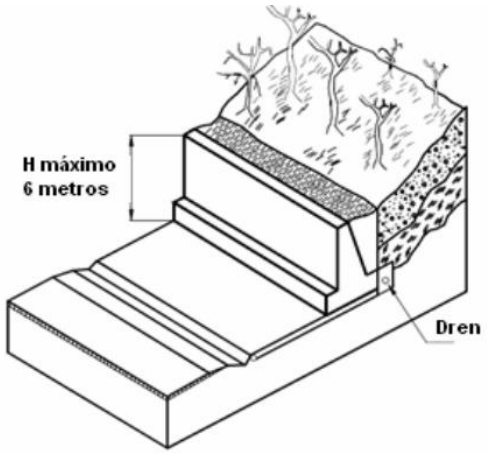


Figura 38. Muro de concreto sin refuerzo.

Fuente: INVIAS, 2006.

9.2.4.4. Muros de concreto con refuerzo: Estructura en concreto diseñada para soportar las cargas y movimientos debido a la presión del suelo, consiste en una placa vertical en voladizo o apoyada. Al igual que en los muros de gravedad se debe diseñar con un sistema de drenaje o lloraderos, para que el agua represada salga. Se usa como estructura de contención y en corrección de deslizamientos rotacionales y traslacionales. Principalmente, se tienen los siguientes tipos de muros en concreto reforzado:

- Muros empotrados o en voladizo: Estructuras con forma de L o T invertida, compuestos por una placa monolítica semivirtual o inclinada con otra placa en la base (INVIAS, 2006).
- Muros con Contrafuertes: Estructuras donde la placa vertical esta soportada por contrafuertes monolíticos que dan rigidez y a su vez transmiten las cargas a la cimentación, pueden ser trasdós (donde los apoyos están en el talud) e intradós (como apoyo de la cara contraria al talud), y los apoyos usados pueden ser triangulares o en L (H. Gómez; 2013).
- Muros con estribos: Consiste en la estructura de muro con contrafuertes pero que además hace aplicación de una placa superior que ayuda a soportar mejor el momento y aporta mayor rigidez a la estructura (INVIAS, 2006).

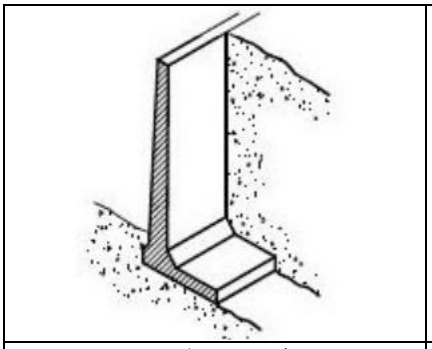
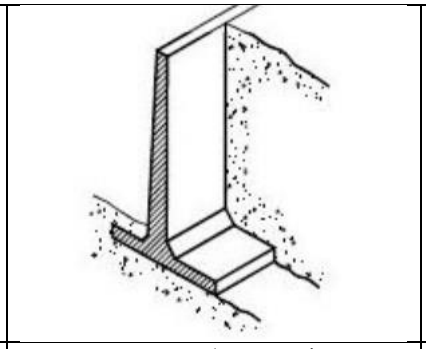
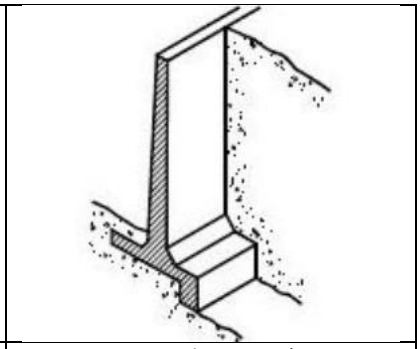
		

Figura 39. Muro de contención en Fuente: INVIAS, 2006	*Figura 40. Muro de contención en T invertida. Fuente: INVIAS, 2006.*	*Figura 41. Muro de contención en T con llave. Fuente: INVIAS, 2006*

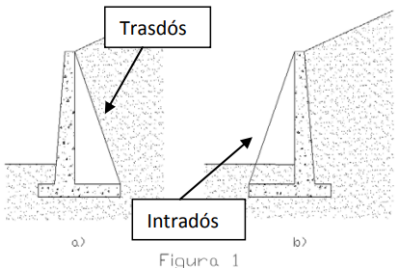
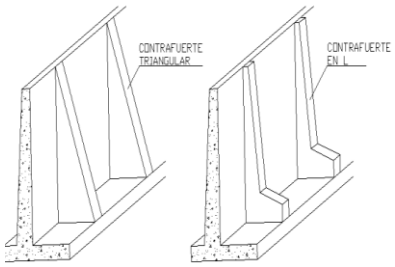
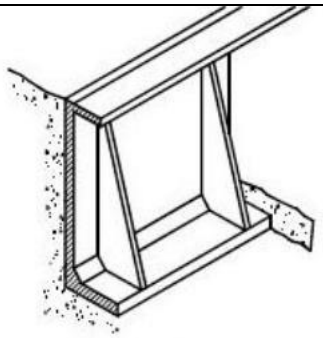
		

Figura 42. Muro de contención con Contrafuertes (1) Trasdós (2) Intradós. Fuente: H. Gómez, 2013	*Figura 43. Muro de contención con Contrafuertes (1) Triangular (2) En L Fuente: H. Gómez, 2013.*	*Figura 44.Muro de contención contrafuerte y estribo. Fuente: INVIAS, 2006.*

9.2.4.5. Pantallas: Según el INVIAS (2006) Son muros de concreto vaciado directamente de cara al talud con formaleta, o construidos con elementos prefabricados, destinadas a sostener los cortes de terreno, restringir las deformaciones, impermeabilizar una excavación o al menos reducir los limites admisibles las filtraciones (E. Errázuriz, 2009).

9.3. CAPITULO 3: RELACION ENTRE FACTORES CLIMATICOS Y INFRAESTRUCTURA CARRETERA:

Como resultado de investigación de la información contenida en este documento se buscó generar una herramienta que sintetizara y ofreciera una visión clara de los puntos más importantes entre estos dos ítems, es por lo que para dar una visión general del impacto futuro que tendría los fenómenos climáticos se realizó una primera matriz que ofreciera el panorama en los tres periodos de tiempo descritos en la Tercera Comunicación Nacional del Cambio Climático 2011-2040, 2041 – 2070 y 2071 – 2100.

Esta matriz también tiene como propósito determinar la posibilidad de que tengan lugar los eventos y sub-eventos amenazantes del Cambio Climático. Para ello se cuenta con lo que señalan al respecto los escenarios de Cambio climático de la 3ª Comunicación Nacional. Además, se cuenta con la valoración, hasta ahora cualitativa, de la vulnerabilidad del territorio o su susceptibilidad a sufrir los sub-eventos relevantes.

Tabla 7. Matriz de caracterización de eventos y sub-eventos amenazantes del Cambio climático.

Fuente: Propia.

Eventos primarios del CC		**INCREMENTOS DE PRECIPITACIONES**		
Estimaciones de escenarios cambio climático	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2011-2040	Se espera que aproximadamente en un 13% del territorio nacional se presente una aumento del 10 a 30% de precipitaciones, principalmente en la Región Andina (Tolima, Risaralda, Nariño, Huila, Cauca, Caldas y Cundinamarca) en los cuales se presentaran excesos superiores al 10%.		
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2041-2070	Se proyecta que aproximadamente en un 13% del territorio nacional se presente una aumento del 10 a 30% de precipitaciones, principalmente en la Región Andina (Tolima, Risaralda, Nariño, Huila, Cauca, Caldas, Cundinamarca y Quindio) en los cuales se presentaran excesos superiores al 10%. Los departamentos de Caldas y Risaralada podrían ecperimentaro los excesos mas severos (22,61% y 20,32%).		
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2071-2100	Se proyecta que aproximadamente en un 14% del territorio nacional se presente una aumento del 10 a 30% de precipitaciones, principalmente en la Región Andina (Tolima, Risaralda, Nariño, Huila, Cauca, Caldas, Cundinamarca y Quindio) en los cuales se presentaran excesos superiores al 10%. Los departamentos de Caldas y Risaralada podrían ecperimentaro los excesos mas severos (28,12% y 28,36%).		
Eventos derivados del CC		**INUNDACIONES**	**FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA**	**AVENIDAS TORRENCIALES**
Estimaciones de escenarios cambio climático	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2011-2040	La variación de precipitaciones en este escenario incide en la posible ocurrencia de inundaciones mayormente en la región Andina y el piedemonte llanero.	La variación de precipitaciones en este escenario incide en la posible ocurrencia de fenómenos de remoción en masa en la mayor parte de la región Andina, y una parte del pacifico.	La variación de precipitaciones en este escenario incide en la posible ocurrencia de fenómenos de avenidas torrenciales.
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2041-2070	La variación de precipitaciones en este escenario incide en la posible ocurrencia de inundaciones mayormente en la región Andina y el piedemonte llanero.	La variación de precipitaciones en este escenario incide en la posible ocurrencia de fenómenos de remoción en masa en la mayor parte de la región Andina, y una parte del pacifico.	La variación de precipitaciones en este escenario no incide en la posible ocurrencia de fenómenos de avenidas torrenciales.
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2071-2100	La variación de precipitaciones en este escenario incide en la posible ocurrencia de inundaciones mayormente en la región Andina y el piedemonte llanero.	La variación de precipitaciones en este escenario incide en la posible ocurrencia de fenómenos de remoción en masa en la mayor parte de la región Andina, y una parte del pacifico.	La variación de precipitaciones en este escenario incide en la posible ocurrencia de fenómenos de avenidas torrenciales.
CALIFICACIÓN DEL SUBEVENTO AMENAZANTE				
Eventos secundarios/sub eventos del CC		**INUNDACIONES**	**FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA**	**AVENIDAS TORRENCIALES**
Calificación		Alta	Alta	Media
Interpretación		Según el UNGRD en Colombia se ha identificado 190.935Km2 con condiciones favorables a la inundación, donde el 40% de este valor corresponde a territorio en Bogotá y Antioquia, y lo que mas pérdidas anuales presentan por este evento son Antioquia, Bolivar, Santander, Magdalena y Boyaca. Con el incremento esperado bajo los escenarios actuales, la amenaza por inundaciones es alta. *Para el análisis de riesgo se tiene en cuenta el escenario 2011 - 2040 que es el que tiene menor nivel de incertidumbre."	De acuerdo con el SGC, del territorio nacional al menos el 4% estan muy alta amenaza, 20% en amenaza alta, 22% en amenaza media, y 50% restante en amenaza baja. Principalmente en departamentos como Antioquia, Cundinamarca, Nariño, Tolima, Boyaca, Santander, Valle del Cauca y Cauca. La mayoria de los departamentos mencionados esperan un incremento de precipitaciones en los escenarios siguientes. *Para el análisis de riesgo se tiene en cuenta el escenario 2011 - 2040 que es el que tiene menor nivel de incertidumbre".	Según la información consultada este tipo de eventos tiene menor ocurrencia en el País frente a inundaciones, y fenomenos de remoción en masa. Las zonas mas suceptibles serían la region Andina una pequeña parte de la región pacífica. Sin embargo, en base a los escenarios su amenaza sería media, considerando los escanarios presentados. *Para el análisis de riesgo se tiene en cuenta el escenario 2011 - 2040 que es el que tiene menor nivel de incertidumbre".

Eventos primarios del CC		DISMINUCIÓN DE PRECIPITACIONES	
Estimaciones de escenarios cambio climático	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2011-2040	Se espera que aproximadamente en un 32% del territorio nacional se presente una disminución del 10 a 40% de precipitaciones, principalmente en la(s) Región Caribe (San Andres y Providencia);Región Caribe (La Guajira, Sucre, Cesar, Bolivar, Magdalena); Región Amazonica (Vaupés, Caquetá, Amazonas) se presentaran deficits por encima del 10%.	
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2041-2070	Se proyecta que para este periodo el 29,6% del país presentara una disminución de precipiaciones entre el 10 a 40%, en la(s) región(es) Caribe (San Andres y Providencia); Región Caribe (La Guajira, Sucre, Cesar, Bolivar, Magdalena); Región Amazonica (Vaupés, Caquetá, Amazonas). Se presentaran deficits por encima del 13%, siendo en la zona insular la mas cercana a deficit severo (32,78%).	
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2071-2100	Se pronostica que aproximadamente en un 30% del territorio nacional se presente una disminución del 10 a 40% de precipitaciones, principalmente en la(s) Región Caribe (San Andres y Providencia);Región Caribe (La Guajira, Sucre, Cesar, Bolivar, Magdalena) con aumentos de 3-5 puntos porcentuales; Región Amazonica (Vaupés, Caquetá, Amazonas) se presentaran deficits por encima del 13%. La zona insular seguira siendo la mas cercana a deficit severo, con un incremento porcentual de 0,29%.	
Eventos derivados del CC		SEQUÍA	INCENDIOS FORESTALES
Estimaciones de escenarios cambio climático	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2011-2040	La variación de precipitaciones planteada en este escenario incide en la ocurrencia de sequías en la región Caribe y Amazonica.	La variación de precipitaciones planteada en este escenario no incide en la ocurrencia de incendios forestales.
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2041-2070	La variación de precipitaciones planteada en este escenario incide en la ocurrencia de sequías en la región Caribe y Amazonica.	La variación de precipitaciones planteada en este escenario no incide en la ocurrencia de incendios forestales.
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2071-2100	La variación de precipitaciones planteada en este escenario incide en la ocurrencia de sequías en la región Caribe y Amazonica.	La variación de precipitaciones planteada en este escenario no incide en la ocurrencia de incendios forestales.
CALIFICACIÓN DEL SUBEVENTO AMENAZANTE			
Eventos secundarios/sub eventos del CC		SEQUÍA	INCENDIOS FORESTALES
Calificación		Media	Media
Interpretación		De acuerdo con la información consultada, en el área de estudio se presenta amenaza media por sequía; sin embargo, en el escenario 2011 - 2040* de cambio climático ya que se espera disminución de precipitaciones (déficit) y por tanto la calificación de este subevento es media. *Para el análisis de riesgo se tiene en cuenta el escenario 2011 - 2040 que es el que tiene menor nivel de incertidumbre.	De acuerdo con la información consultada, en el área de estudio se presenta amenaza tanto baja como media y alta por incendios forestales; esto sumado a que en el escenario 2011 - 2040* de cambio climático se espera disminución de precipitaciones (déficit), da como resultado una calificación media para este subevento. *Para el análisis de riesgo se tiene en cuenta el escenario 2011 - 2040 que es el que tiene menor nivel de incertidumbre.

Eventos primarios del CC		AUMENTO DE TEMPERATURA		
Estimaciones de escenarios cambio climático	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2011-2040	El cambio esperado en el periodo de 2011 - 2040 podría ser un aumento gradual de 0,9°C en aproximadamente 50% del territorio, siendo 0,7°C el menor valor esperado, y 1,1°C el mayor esperado. Los mayores aumentos se daran en las regiones Caribe (Atlantico, Cesar,Magdalena); y Amazonica (Vaupés). En cuanto a las temperaturas en el mar se sugiere que el aumento sera en promedio de 0,5°C en el mar Caribe y 0,7°C en el mar Pacifico.		
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2041-2070	Se espera que el aumento sea de entre 1,6 -1,7 °C para este periodo en el 49% del territorio. Sin embargo, el menor valor esperado sera 1,4°C y 1,9°C el mayor valor esperado. Los mayores aumentos estaran en las regiones Andina (Valle del Cauca, Cundinamarca, Huila, Norte de Santander, Quindio); Orinoquia (Vichada, Meta); Amazonia (Vichada, Putumayo); Caribe (Sucre, Magdalena); y Pacifica (Valle del Cauca). En cuanto a las temperaturas en el mar se sugieren aumentos del 0,85°C en el Caribe y 1,2°C en el Pacifico.		
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2071-2100	Se espera que el aumento sea de entre 2,2 -2,4 °C para este periodo en el 59% del territorio. Sin embargo, el menor valor esperado sera 2,2°C y 2,4°C el mayor valor esperado. Los mayores aumentos estaran en las regiones Andina (Valle del Cauca, Cundinamarca, Huila, Norte de Santander, Quindio); Orinoquia (Vichada); Amazonia (Vichada, Amazonas); Caribe (Sucre, Magdalena, Bolivar); y Pacifica (Valle del Cauca). En cuanto a las temperaturas en el mar se sugieren aumentos del 1,5°C en el Caribe y 1,6 - 2°C en el Pacifico.		
Eventos derivados del CC		**SEQUÍA**	**OLAS DE CALOR**	**AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR**
Estimaciones de escenarios cambio climático	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2011-2040	El aumento bajo de temperatura planteado en este escenario puede incidir en la generación de sequías. Sobre todo en la región Caribe y Amazonica y una parte del Pacífico,	El aumento bajo de temperatura planteado en este escenario puede incidir en la generación de olas de calor.	El aumento bajo de temperatura para este escenario inidca que el mayor valor de variación de ANM de 7,5 cm en la región Caribe.
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2041-2070	El aumento alto de temperatura planteado en este escenario puede incidir en la generación de sequías en las regiones en la región Caribe y Amazonica y una parte del Pacífico.	El aumento medio de temperatura planteado en este escenario incide en la generación de olas de calor en la reglón Caribe, Amazonicam Orinquia y una parte del Pacifico.	El aumento medio de temperatura para este escenario inidca que el mayor valor de variación de ANM de 15,5 cm en la región Caribe.
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2071-2100	El aumento alto de temperatura planteado en este escenario puede incidir en la generación de sequías en la región Caribe y Amazonica y una parte del Pacífico.	El aumento alto de temperatura planteado en este escenario propicia la generación de olas de calor en la reglón Caribe, Amazonicam Orinquia y una parte del Pacifico.	El aumento alto de temperatura para este escenario inidca que el mayor valor de variación de ANM de 26 cm en la región Caribe, en la región pacifica de 9,3 cm. .
CALIFICACIÓN DEL SUBEVENTO				
Eventos secundarios/sub eventos del CC		**SEQUÍA**	**OLAS DE CALOR**	
Calificación		Media	Media	Baja
Interpretación		De acuerdo con la información consultada, en el área de estudio se presenta amenaza media por sequía; en los departamentos donde se espera un aumento de temperatura, esto sumado a que en el escenario 2011 - 2040* de cambio climático se espera aumento de temperatura pero con un nivel medio de variación. *Para el análisis de riesgo se tiene en cuenta el escenario 2011 - 2040 que es el que tiene menor nivel de incertidumbre.	De acuerdo con la información consultada, en el área de estudio se presenta amenaza alta por olas de calor; sin embargo. en el escenario 2011 - 2040* de cambio climático se espera aumento de temperatura pero con un nivel bajo de variación y, por lo tanto, la calificación final de este subevento es media. *Para el análisis de riesgo se tiene en cuenta el escenario 2011 - 2040 que es el que tiene menor nivel de incertidumbre.	De acuerdo con la información consultada, en el área de estudio se presenta amenaza baja por aumento del nivel del mar. En el escenario 2011 - 2040* de cambio climático se espera aumento de temperatura pero con un nivel bajo de variación y, por lo tanto, la calificación final de este subevento es bajo. *Para el análisis de riesgo se tiene en cuenta el escenario 2011 - 2040 que es el que tiene menor nivel de incertidumbre.

Eventos primarios del CC		VARIABILIDAD CLIMÁTICA
Estimaciones de escenarios cambio climático	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2011-2040	Debido a un aumento de temperatura existe la alta probabilidad de que los fenomenos de variabilidad climatica interanual relacionados al ciclo ENOS- Niño y Niña, exacerben las condiciones hacia la mitad del siglo XXI. Según la tercera comunicación indican que en presencia de Niño las condiciones secas descritas pueden agravarse con olas de calor y aumentos de días calurosos de 1,5 a 2 días mas, e intensificar las lluvias de temporada en las regiones. Visceversa, en presencia de la Niña las condiciones frías podrian incrementar las precipitaciones, y los días lluviosos además de propiciar las bajas de temperaturas.
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2041-2070	Con la intensificación de algunas variables climaticas tambien existe una alta probabilidad que los fenomenos meteorologicos que se presentan en la zona debido a la variabilidad climatica del ciclo Niño-ENOS, amplifiquen las precipitaciones en las regiones que suelen verse afectadas y incremente la sequía y número de días calurosos para la segunda mitad del siglo según los reportes del IPCC. De igual manera que con el desarrollo de la temperatura por el calentamiento global, el fenomeno predominante para la mitad del siglo podría ser el Niño, sin embargo en cuanto a frecuencia y amplitud la certeza es baja, por lo que hay poco o ningún cambio según proyecciones actuales. Aun así, en presencia de la Niña las condiciones frías podrian incrementar las precipitaciones, y los días lluviosos además de propiciar las bajas de temperaturas.
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2071-2100	Hacia finales del siglo XXI se evidencia que el fenomeno predominante seguiría siendo con un nivel alto de confianza (CEPAL, 2014) el Niño, por lo que las condiciones secas se intensificarían, al igual que las precipitaciones asociadas a este fenomeno junto a las proyecciones descritas por los escenarios mencionados en el CC. Sobre su amplitud o frecuencia el variación seria poca o ninguna según indican los modelos actuales, hay una baja certeza en cuanto a su proyección. Aunque, en presencia de la Niña las condiciones frías podrían recrudecerse, sobre el escenario de aumento de precipitaciones para este periodo temporal.

Eventos derivados del CC		INUNDACIONES	AVENIDAS TORRENCIALES	FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA	OLAS DE CALOR	SEQUÍA	INCENDIOS FORESTALES
Estimaciones de escenarios cambio climático	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2011-2040	La tendencia actual de ocurrencia del fenómeno de inundaciones se puede ver incrementada por los porcentajes de variabilidad de precipitación generados por el fenómeno de La Niña.	La tendencia actual de ocurrencia del fenómeno de avenidas torrenciales se puede ver incrementada por los porcentajes de variabilidad de precipitación generados por el fenómeno de La Niña.	La tendencia actual de ocurrencia del fenómeno de remoción en masa se puede ver incrementada por los porcentajes de variabilidad de precipitación generados por el fenómeno de La Niña.	Ante la ocurrencia de un fenómeno típico de El Niño, el calentamiento severo puede favorecer la ocurrencia de olas de calor.	Ante la ocurrencia de un fenómeno típico de El Niño, el calentamiento severo puede favorecer la ocurrencia de sequías.	Ante la ocurrencia de un fenómeno típico de El Niño, el calentamiento severo puede favorecer la ocurrencia de incendios forestales.
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2041-2070	La tendencia actual de ocurrencia del fenómeno de inundaciones se puede ver incrementada por los porcentajes de variabilidad de precipitación generados por el fenómeno de La Niña.	La tendencia actual de ocurrencia del fenómeno de avenidas torrenciales se puede ver incrementada por los porcentajes de variabilidad de precipitación generados por el fenómeno de La Niña.	La tendencia actual de ocurrencia del fenómeno de remoción en masa se puede ver incrementada por los porcentajes de variabilidad de precipitación generados por el fenómeno de La Niña.	Ante la ocurrencia de un fenómeno típico de El Niño, el calentamiento severo puede favorecer la ocurrencia de olas de calor.	Ante la ocurrencia de un fenómeno típico de El Niño, el calentamiento severo puede favorecer la ocurrencia de sequías.	Ante la ocurrencia de un fenómeno típico de El Niño, el calentamiento severo puede favorecer la ocurrencia de incendios forestales.
	Escenario 3ª Comunicación Nacional CC 2071-2100	La tendencia actual de ocurrencia del fenómeno de inundaciones se puede ver incrementada por los porcentajes de variabilidad de precipitación generados por el fenómeno de La Niña.	La tendencia actual de ocurrencia del fenómeno de avenidas torrenciales se puede ver incrementada por los porcentajes de variabilidad de precipitación generados por el fenómeno de La Niña.	La tendencia actual de ocurrencia del fenómeno de remoción en masa se puede ver incrementada por los porcentajes de variabilidad de precipitación generados por el fenómeno de La Niña.	Ante la ocurrencia de un fenómeno típico de El Niño, el calentamiento severo puede favorecer la ocurrencia de olas de calor.	Ante la ocurrencia de un fenómeno típico de El Niño, el calentamiento severo puede favorecer la ocurrencia de sequías.	Ante la ocurrencia de un fenómeno típico de El Niño, el calentamiento severo puede favorecer la ocurrencia de incendios forestales.

CALIFICACIÓN DEL SUBEVENTO AMENAZANTE						
Eventos secundarios/sub eventos del CC	INUNDACIONES	AVENIDAS TORRENCIALES	FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA	OLAS DE CALOR	SEQUÍA	INCENDIOS FORESTALES
Calificación	Alta	Alta	Alta	Media	Media	Media
Interpretación	La variación de precipitaciones producto de La Niña en el área tienen incidencia en la generación de inundaciones, considerando que para los escenarios actuales se espera incremento de precipitaciones en un 13 a 14% del país.	La variación de precipitaciones producto de La Niña en el área tienen incidencia en la generación de avenidas torrenciales. Con le incremento de precipitaciones en los escenarios mencionados, la ocurrencia de la Niña incrementaria la amenaza por la intensificación y la frecuencia de las lluvias en sus ciclos anuales.	La variación de precipitaciones producto de La Niña influira en el territorio haciendo suceptible el terreno de una buena parte del país, sobre todo en los lugares de alta pendiente y tambien en aquellos donde se esepera un aumento de precipitaciones por CC.	El calentamiento severo producto del fenómeno de El Niño incide en la generación de olas de calor, y aumenots de dias calurosos.	El calentamiento severo producto del fenómeno de El Niño puede incidir en la ocurrencia de sequías; sin embargo, en el área de estudio la amenaza por sequía es media y por tanto, la calificación del subevento es media.	El calentamiento severo producto del fenómeno de El Niño puede incidir en la ocurrencia de incendios forestales. Teniendo en cuenta que en el área se puede presentar este subevento con niveles de amenaza tanto bajos como medios y altos, la calificación del subevento se ha valorado como media.

Una vez retratadas las dinámicas climáticas cambiantes existentes en la revisión documental, y sintetizadas en eventos y sub-eventos amenazantes para Colombia en la presencia de factores climáticos como precipitaciones y temperaturas. Se desarrolló una segunda matriz que estableciera la relación de estos impactos con la infraestructura revisada en el ítem 2, el propósito de la matriz es mencionar los daños o impactos, catalogados de manera cualitativa de bajo a alto, que puede sufrir la infraestructura a la que se hace mención en este documento, considerando que cada fenómeno tendrá un efecto en sobre el activo durante su ocurrencia.

Los impactos/efectos mencionados en esta matriz son parte de la investigación en la literatura, que han sido consolidados por medio de la revisión documental, dando una muestra de lo observado y consultado por otras fuentes que sirve como una síntesis al investigador para entender que la ocurrencia de los eventos siempre tendrá una repercusión en el activo, incluso aquellas que tiene impactos bajos. La calificación dada al impacto fue desarrollada teniendo en cuenta que el impacto más alto que podría tener la estructura sería la falla o colapso de esta, un impacto medio sería la perdida parcial o deformación de la estructura y un impacto bajo sería que el impacto desarrollara condiciones vulnerables o debilitara la estructura en alguno de sus componentes.

Tabla 8. Matriz de impactos por Amenazas Naturales.

Fuente: Propia.

Estructura	Nivel	Inundaciones	Movimientos en masa	Avenidas torrenciales	Olas de Calor	Sequía/incendios Forestales	Aumento de Nivel del Mar/Tormenta ciclónica
Puentes o Pontones - Superestructura	Impacto Alto:	Falla estructural por aumento del nivel la lámina de agua y el arrastre de sedimentos que puede traer el cauce (USAID, 2015).	Falla estructural por socavación terraplenes y taludes.	Colapso de la estructura por el contacto con sedimentos y la fuerza del agua que fluye. (FHWA, 2018).	Falla en juntas de dilatación (PIARC, 2018).		Colapso de estructura, y arrastre del tablero cuando se den alturas máximas o fuertes descargas de agua (FHWA, 2018).
	Impacto Medio:	Degradación de la estructura. Falla en las Juntas de Dilatación. Cierre de vía por inundación cuando la altura de caudal supere el gálibo. Además de que	Deformación o degradación de aletas y losas de aproximación por inestabilidad de terreno.	Degradación del hormigón y corrosión en elementos metálicos. (CAF, 2018).	Agrietamiento por expansión/contracción térmica. (FHWA, 2018). Degradación de superficie de rodadura. (D. Gómez & E. Muñoz, 2013).	Socavación lateral donde se encuentran las losas de aproximación y las aletas. (D. Gómez & E. Muñoz, 2013)	Cierre de vía debido que el agua se asenté sobre el tablero imposibilitando el tránsito a través de estructura (JCR, 2012).

		puede generar condiciones inadecuadas para el tránsito (JCR, 2012). Infiltración en elementos estructurales.					
	Impacto bajo:	Aumento de aguas en el sistema de drenaje. Corrosión de elementos en acero. (CAF, 2018).	Exposición de anclajes ante el movimiento de tierras en los terraplenes en los puntos de unión entre losas, aletas y terreno. (D. Gómez & E. Muñoz, 2013)	Socavación lateral donde se encuentran las losas de aproximación y las aletas.	Cambios bruscos en la temperatura interna del asfalto que puede generar patologías (PIARC, 2015) La refracción solar en días calurosos podría generar daños a vehículos y provocar accidentes (PIARC, 2015)	Los incendios forestales podrían traer dificultades para transitar la vía y generar cierres viales parciales o totales sobre el puente.	Disminución de Gálibo libre (SHA, 2014) Degradación de elementos estructurales por infiltración (SHA, 2014) Corrosión de elementos estructurales debido a la infiltración de agua salada.
Puentes o Pontones - Subestructura	Impacto Alto:	Falla estructural por aumento del nivel la lámina de agua. (BID, 2019).	Colapso estructural por movimiento y arrastre de tierras sobre las pilas o pilones. (M. Canales & J. Salazar, 2020).	Falla estructural en pilas y pilones, por el arrastre del agua. Colapso de la estructura debido a la inestabilidad del terreno por socavación (J. Suarez, 2023).	Falla en juntas de dilatación, y elementos estructurales de metal que estén expuestos a expansión/contracción por el cambio de temperatura brusca (PIARC, 2018).		Falla estructural por aumento del nivel la lámina de agua. (BID, 2019). Colapso estructural por daños en pilas o pilones debido al arrastre de agua.
	Impacto Medio:	Degradación de la estructura. Falla en las Juntas de Dilatación. Infiltración en elementos estructurales. Daño de elementos estructurales por la acumulación de residuos y sedimentos. (BID, 2019)	Deformación de elementos estructurales verticales, por debilitamiento o movimiento en taludes.	Degradación de la estructura. Infiltración en elementos estructurales. Daño de elementos estructurales por la acumulación de residuos y sedimentos.	Agrietamiento o formación de protuberancias por expansión térmica. (FHWA, 2018).		Degradación y desprendimiento de elementos de la estructura por el flujo de agua. Infiltración en elementos estructurales.

	Impacto bajo:	Corrosión de elementos en acero y deterioro en elementos de concreto. (D. Gómez & E. Muñoz, 2013)		Corrosión de elementos en acero y deterioro en elementos de concreto. (D. Gómez & E. Muñoz, 2013)	Deterioro de la infraestructura dependiendo de los materiales de construcción (USAID, 2015)	Debilitamiento y erosión de terreno debido a la sequía y degradación de capa vegetal en el suelo.	Corrosión de elementos en acero y deterioro en elementos de concreto. (D. Gómez & E. Muñoz, 2013)
Puentes o Pontones - Cimentación	Impacto Alto:	Colapso de la estructura por la debilitación de la fundación debida a la socavación exacerbada por condiciones hidrológicas extremas (USAID, 2015).	Colapso de estructura por falla en elementos estructurales debido al arrastre de masa sobre la unión entre la subestructura y cimentación.	Colapso de la estructura por falla en estructuras de soporte por arrastre de la corriente. (J. Suarez, 2023).			Colapso de la estructura por la debilitación de la fundación debida a la socavación exacerbada por condiciones hidrológicas extremas (USAID, 2015).
	Impacto Medio:	Debilitación de la fundación por movimientos en el lecho del cauce, o movimientos de tierra por inundaciones en el terreno. (JCR, 2012). Desplazamiento de la cimentación debido a la socavación y movimiento de aguas.	Deformación de elementos estructurales verticales, por debilitamiento o movimiento en taludes. Exposición de la estructura debido a movimientos de tierra.	Arrastre y socavación en el material del fondo, lo que puede dejar vulnerables los cimientos. (J. Suarez, 2023). Daño en estructura de cimentación por arrastre de sedimentos.	Agrietamiento o formación de protuberancias por expansión térmica. (FHWA, 2018). Deterioro de la infraestructura dependiendo de los materiales de construcción (USAID, 2015)		Debilitación de la fundación por movimientos en el lecho del mar en la ocurrencia de un fenómeno como una marejada ciclónica o una tormenta (FHWA, 2018).
	Impacto bajo:	Acumulación de escombros en la cimentación que puede acelerar la degradación (J. Suarez, 2023).	Inestabilidad en el terreno de fundación que puede deformar la estructura o exponer elementos de la cimentación.	Acumulación de escombros en la cimentación que puede acelerar la degradación (J. Suarez, 2023).		Debilitamiento del suelo de cimentación por cambios en la humedad del suelo tras la reducción acelerada del flujo de agua en un evento de sequía.	Corrosión de elementos en acero y erosión en elementos de concreto. (D. Gómez & E. Muñoz, 2013)

Drenaje - Disipadores de energía	Impacto Alto:	Colapso del canal debido al transporte de agua sobre la capacidad para la que fue diseñada. Daños en la estructura por un aumento de caudal sobre el máximo de diseño (Campos et al., 2017). Daños en la estructura por arrastre de sedimentos.	Arrastre de la estructura por deslizamiento de tierra del terreno (González y Domínguez, 2024). Sepultamiento de la estructura bajo el flujo de tierra. (Anónimo, s, f).	Colapso del canal debido a la intensidad y frecuencias de lluvias que pueden arrastrar aguas. Daños en la estructura por un aumento de caudal sobre el máximo de diseño (Campos et al., 2017). Daños en la estructura por arrastre de sedimentos.			Colapso del canal debido al transporte de agua sobre la capacidad para la que fue diseñada.
	Impacto Medio:	El arrastre de aguas por encima del diseño puede generar cambios en la velocidad de flujo y la fuerza de chorro que genere socavación en la estructura. Desbordamiento del canal debido al exceso de agua sobre el caudal de máximo.	Daño en paredes de canal debido al movimiento de tierras. Desplazamiento de la base de canal y paredes debido al flujo de tierras que faciliten la infiltración.	El arrastre de aguas por encima del diseño puede generar cambios en la velocidad de flujo y la fuerza de chorro que genere socavación en la estructura.	Deterioro de la estructura o deformaciones por cambios bruscos en la temperatura.		Daños en la estructura por un aumento de caudal sobre el máximo de diseño (Campos et al., 2017). Daños en la estructura por arrastre de sedimentos tierra adentro.
	Impacto bajo:	El arrastre de sedimentos puede generar taponamientos o alterar el fondo del canal. Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017).	Obstrucción de canal y arrastre de sedimentos por movimientos en masa (BID, 2019).	El arrastre de sedimentos puede generar taponamientos o alterar el fondo del canal. Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017).	Los cambios de temperatura en el suelo pueden generar que las partes de la estructura se desplacen y faciliten la infiltración de agua.	Durante épocas de sequía se facilitan la sedimentación en alcantarillas. (FHWA, 2012).	Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017

Drenaje - Cunetas	Impacto Alto:	Colapso de la estructura por el flujo de agua que facilite la infiltración de aguas. Daños en la estructura por un aumento de caudal sobre el máximo de diseño (Campos et al., 2017). Daños en la estructura por arrastre de sedimentos.	Arrastre de la estructura por deslizamiento del terreno (González y Domínguez, 2024). Sepultamiento de la estructura bajo el flujo de tierra (Anónimo, s.f.)	Arrastre y perdida de la estructura debido a la intensidad y fuerza del flujo de agua. Daños en la estructura por un aumento de caudal sobre el máximo de diseño (Campos et al., 2017). Daños en la estructura por arrastre de sedimentos.			Arrastre y perdida de la estructura debido a la intensidad y fuerza del flujo de agua Daños en la estructura por un aumento del nivel del mar o evento de tormenta/marejada sobre el máximo de diseño (Campos et al., 2017).
	Impacto Medio:	El arrastre de aguas por encima del diseño puede generar cambios en la velocidad de flujo y la fuerza de chorro que genere socavación en la estructura. Desbordamiento del canal.	Daño en paredes de canal debido al movimiento de tierras. Desplazamiento de la base de canal y paredes debido al flujo de tierras que faciliten la infiltración.	El arrastre de aguas por encima del diseño puede generar cambios en la velocidad de flujo y la fuerza de chorro que genere socavación en la estructura.	Deterioro de la estructura o deformaciones por cambios bruscos en la temperatura.	Arrastre de sedimentos y escombros, tras cambios en los niveles de escorrentía por eventos como incendios forestales que degradan la capa vegetal (FHWA, 2018).	Desbordamiento de sistema de drenaje que pueda impactar la estructura misma y otras por filtración de agua que no son redirigidas (FHWA, 2018).
	Impacto bajo:	El arrastre de sedimentos puede generar taponamientos o alterar el fondo del canal. Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017).	Taponamiento de cuneta y arrastre de sedimentos por movimientos en masa (BID, 2019).	El arrastre de sedimentos puede generar taponamientos o alterar el fondo del canal. Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017)	Los cambios de temperatura en el suelo pueden generar que las partes de la estructura se desplacen y faciliten la infiltración de agua.	Durante épocas de sequía se facilitan la sedimentación en alcantarillas. (FHWA, 2012).	El arrastre de sedimentos puede generar taponamientos o alterar el fondo del canal (Campos et al., 2017). Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017).

Drenaje - Zanjas de Coronación	Impacto Alto:	Colapso de la zanja por intensidad y fuerza del flujo de agua, además del arrastre de sedimentos. Daños en la estructura por un aumento de caudal sobre el máximo de diseño (Campos et al., 2017). Daños en la estructura por arrastre de sedimentos.	Arrastre de la estructura por deslizamiento del terreno (González y Domínguez, 2024). Sepultamiento de la estructura bajo el flujo de tierra (Anónimo, s.f.)	Arrastre de la zanja por intensidad y fuerza del flujo de agua, además del transporte de sedimentos. Daños en la estructura por un aumento de caudal sobre el máximo de diseño (Campos et al., 2017). Daños en la estructura por arrastre de sedimentos.			Colapso de la zanja por intensidad y fuerza del flujo de agua, además del arrastre de sedimentos. Daños en la estructura por un aumento del nivel del mar o evento de tormenta/marejada sobre el máximo de diseño (Campos et al., 2017).
	Impacto Medio:	El arrastre de aguas por encima del diseño puede generar cambios en la velocidad de flujo y la fuerza de chorro que genere socavación en la estructura.	Perdida o deterioro de partes del canal por el flujo de tierras. Colapso de las paredes del canal que faciliten la infiltración al suelo.	El arrastre de aguas por encima del diseño puede generar cambios en la velocidad de flujo y la fuerza de chorro que genere socavación en la estructura.	El aumento de temperatura puede deformar la estructura y facilitar la erosión dentro del canal.		Desbordamiento de sistema de drenaje que pueda impactar la estructura misma y otras por filtración de agua que no son redirigidas (FHWA, 2018).
	Impacto bajo:	el arrastre de sedimentos puede generar taponamientos o alterar el fondo del canal. Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017).	Taponamiento de zanjas de coronación y arrastre de sedimentos por movimientos en masa.	El arrastre de sedimentos puede generar taponamientos o alterar el fondo del canal. Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017).	Los cambios bruscos de temperatura facilitan el debilitamiento del suelo de fundación del canal y permitir la infiltración.	Arrastre de sedimentos y escombros, tras cambios en los niveles de escorrentía por eventos como incendios forestales que degradan la capa vegetal (FHWA, 2018).	El arrastre de sedimentos puede generar taponamientos o alterar el fondo del canal (Campos et al., 2017). Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017).
Drenaje - Bajantes o alivios	Impacto Alto:	Daños en la estructura por un aumento de caudal sobre el máximo de diseño (Campos et	Arrastre de la estructura por deslizamiento del terreno (González y Domínguez, 2024).	Daños en la estructura por un aumento de caudal sobre el máximo de diseño (Campos et			Daños en la estructura por un aumento del nivel del mar o evento de

		al., 2017). Daños en la estructura por arrastre de sedimentos.	Sepultamiento de la estructura bajo el flujo de tierra (Anónimo, s.f.)	al., 2017). Daños en la estructura por arrastre de sedimentos.			tormenta/marejada sobre el máximo de diseño (Campos et al., 2017).
	Impacto Medio:	El arrastre de aguas por encima del diseño puede generar cambios en la velocidad de flujo y la fuerza de chorro que genere socavación en la estructura.		El arrastre de aguas por encima del diseño puede generar cambios en la velocidad de flujo y la fuerza de chorro que genere socavación en la estructura.	Deterioro de la estructura o deformaciones por cambios bruscos en la temperatura.	Arrastre de sedimentos y escombros, tras cambios en los niveles de escorrentía por eventos como incendios forestales que degradan la capa vegetal (FHWA, 2018).	Desbordamiento de sistema de drenaje que pueda impactar la estructura misma y otras por filtración de agua que no son redirigidas (FHWA, 2018).
	Impacto bajo:	El arrastre de sedimentos puede generar taponamientos en salida del canal y alterar el fondo del canal. Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017).	Taponamiento de bajantes y arrastre de sedimentos por movimientos en masa (BID, 2019).	El arrastre de sedimentos puede generar taponamientos o alterar el fondo del canal. Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017).	Los cambios bruscos de temperatura facilitan el debilitamiento del suelo de fundación del canal y permitir la infiltración.		El arrastre de sedimentos puede generar taponamientos o alterar el fondo del canal (Campos et al., 2017). Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017).
Drenaje - Pocetas o cajas colectoras	Impacto Alto:	Perdida parcial o total de la estructura por el flujo de agua.	Arrastre de la estructura por deslizamiento del terreno (González y Domínguez, 2024). Sepultamiento de la estructura bajo el flujo de tierra (Anónimo, s.f.)	Perdida parcial o total de la estructura por el arrastre de agua y sedimentos.			Daños en la estructura por un aumento del nivel del mar o evento de tormenta/marejada sobre el máximo de diseño (Campos et al., 2017).

	Impacto Medio:	Desbordamiento de aguas que puedan asentarse sobre el terreno o la vía erosionado terraplenes. Daños en la estructura inestabilidad del terreno por filtraciones de agua. (BID, 2019) Socavación de entradas, paredes y salidas.	Afectación en la estabilidad del terreno cerca de la obra que genere flujo de tierra al interior y taponamiento por rocas y sedimentos (Campos et al., 2017)	Desbordamiento de aguas que puedan asentarse sobre el terreno o la vía erosionado terraplenes. Daños en la estructura inestabilidad del terreno por filtraciones de agua. (BID, 2019) Socavación de entradas, paredes y salidas. Sedimentación o erosión de canal por acción del flujo de agua.			Desbordamiento de sistema de drenaje que pueda impactar la estructura misma y otras por filtración de agua que no son redirigidas (FHWA, 2018).
	Impacto bajo:	Colmatación por arrastre de sedimentos facilitando taponamientos en el cana e infiltración de agua (BID, 2019)		Colmatación por arrastre de sedimentos facilitando taponamientos en el cana e infiltración de agua (BID, 2019)		Arrastre de sedimentos y escombros tras cambios en los niveles de escorrentía por eventos como incendios forestales que degradan la capa vegetal (FHWA, 2018).	el arrastre de sedimentos puede generar taponamientos o alterar el fondo del canal (Campos et al., 2017). Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017).
Drenaje - Alcantarilla	Impacto Alto:	Perdida parcial o total de la estructura por el flujo de agua.	Arrastre de la estructura por deslizamiento de terreno (González y Domínguez, 2024). Sepultamiento de la estructura bajo el flujo de tierra (Anónimo, s.f.).	Arrastre de la estructura por la velocidad del agua, junto a sedimentos y rocas.			Daños en la estructura por un aumento del nivel del mar o evento de tormenta/marejada sobre el máximo de diseño (Campos et al., 2017).

	Impacto Medio:	Desbordamiento de aguas que puedan asentarse sobre el terreno o la vía erosionado terraplenes. Daños en la estructura inestabilidad del terreno por filtraciones de agua. (BID, 2019) Socavación de las entradas y salidas de la alcantarilla.	Afectación en la estabilidad del terreno cerca de la obra, que pueda generar flujo de tierra al canal o que exponga los muros y aletas. (Campos et al., 2017)	Desbordamiento de aguas que puedan asentarse sobre el terreno o la vía. Daños en la estructura debido a la inestabilidad del terreno por filtraciones de agua.	Deterioro de la estructura o deformaciones por cambios bruscos en la temperatura.		Desbordamiento de sistema de drenaje que pueda impactar la estructura misma y otras por filtración de agua que no son redirigidas (FHWA, 2018).
	Impacto bajo:	Colmatación por arrastre de sedimentos. (BID, 2019)	Taponamiento por rocas y sedimentos (Campos et al., 2017)	Sedimentación o erosión de canal por acción del flujo de agua. Socavación de las entradas y salidas de la alcantarilla.	Los cambios bruscos de temperatura facilitan el debilitamiento del suelo de fundación del canal y permitir la infiltración.	Durante épocas de sequía se facilitan la sedimentación en alcantarillas. (FHWA, 2012).	el arrastre de sedimentos puede generar taponamientos o alterar el fondo del canal (Campos et al., 2017). Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017).
Drenaje - Filtros	Impacto Alto:	Perdida parcial o total del elemento filtrante por el flujo de aguas.	Colapso de la estructura por deslizamiento de terreno (González y Domínguez, 2024).	Perdida parcial o total d la estructura por el flujo de aguas y sedimentos ante un evento climatológico extremo.			Perdida parcial o total del elemento por el flujo de aguas.
	Impacto Medio:	Perdida de material y desbordamiento de agua por exceso de agua.		Perdida de material y desbordamiento de agua por exceso de agua.			Perdida de material y desbordamiento de agua por exceso de agua.
	Impacto bajo:	Colmatación por arrastre de sedimentos. (BID, 2019) Erosión en paredes	Taponamiento por rocas y sedimentos (Campos et al., 2017)	Colmatación por arrastre de sedimentos. (BID, 2019)		Durante épocas de sequía se facilitan la sedimentación y obstrucción de sistemas de	Colmatación por arrastre de sedimentos. (BID, 2019) Erosión en paredes

		por velocidad e intensidad del flujo de descarga.				drenaje. (USGS, 2012).	por velocidad e intensidad del flujo de descarga.
Drenaje - Box Culvert	Impacto Alto:	Perdida parcial o total de la estructura por el flujo de agua.	Arrastre de la estructura por deslizamiento del terreno (González y Domínguez, 2024). Sepultamiento de la estructura bajo el flujo de tierra (Anónimo, s.f.).	Arrastre de la estructura por la velocidad del agua, junto a sedimentos y rocas.			Daños en la estructura por un aumento del nivel del mar o evento de tormenta/marejada sobre el máximo de diseño (Campos et al., 2017).
	Impacto Medio:	Desbordamiento de aguas que puedan asentarse sobre el terreno o la vía erosionado terraplenes. Daños en la estructura inestabilidad del terreno por filtraciones de agua. (BID, 2019) Socavación de las entradas y salidas de la alcantarilla.	Daño en muros, aletas o tapa por el deslizamiento de suelos sobre la estructura.	Desbordamiento de aguas que puedan asentarse sobre el terreno o la vía. Daños en la estructura inestabilidad del terreno por filtraciones de agua. Socavación de las entradas y salidas de la alcantarilla.	Deterioro de la estructura o deformaciones por cambios bruscos en la temperatura.		Desbordamiento de sistema de drenaje que pueda impactar la estructura misma y otras por filtración de agua que no son redirigidas (FHWA, 2018).
	Impacto bajo:	Colmatación por arrastre de sedimentos. (BID, 2019)	Taponamiento por rocas y sedimentos. (Campos et al., 2017) Afectación en la estabilidad del terreno cerca de la obra, que pueda generar flujo de tierra al canal o que exponga los muros y aletas. (Campos et al., 2017)	Sedimentación o erosión de canal por acción del flujo de agua.	Los cambios bruscos de temperatura facilitan el debilitamiento del suelo de fundación del canal y permitir la infiltración.	Durante épocas de sequía se facilitan la sedimentación en alcantarillas. (FHWA, 2012).	El arrastre de sedimentos puede generar taponamientos o alterar el fondo del canal (Campos et al., 2017). Deterioro estructural y erosión en el interior del conducto y las desembocaduras (Campos et al., 2017).

Rodamiento - Pavimento Flexible	Impacto Alto:	Falla estructural o desintegración de capa de asfalto por retención e infiltración de agua en la superficie. (MOPC, 1990).	Pérdida total o parcial de estructura por deslizamiento de talud (UNGRD, 2020). Arrastre de la estructura en el movimiento de tierra que puede llegar afectar infraestructura adyacente, vehículos y personas (UNGRD, 2020).	Falla estructural o desintegración de capa de asfalto por retención e infiltración de agua en la superficie (MOPC, 1990).	Falla estructural por fatiga (L. Maldonado, 2016)		Falla estructural o degradación de capa de asfalto por retención e infiltración de agua en la superficie (MOPC, 1990).
	Impacto Medio:	Deformaciones permanentes por el ingreso de agua a las capas estructurales del pavimento. (MOPC, 1990) Cierre vial por altura de lámina de agua.	Deformaciones en la estructura por cambios en el terreno	Deformaciones permanentes por el ingreso de agua a las capas estructurales del pavimento (MOPC, 1990). Cierre vial por altura de lámina de agua.	Deformaciones permanentes debido a las altas temperaturas de servicio que reducen la estabilidad en mezclas (MOPC, 1990). Oxidación y envejecimiento del pavimento (L. Maldonado, 2016).	Flujo de escombros que generen cierre vial hasta que se retire el material de la vía. (FHWA, 2016)	Deformaciones permanentes por el ingreso de agua a las capas estructurales del pavimento (MOPC, 1990). Cierre vial por altura de lámina de agua.
	Impacto bajo:	Agrietamiento de la estructura por el aumento de la humedad. (MOPC, 1990) Perdida de estabilidad por aumento de la humedad. (MOPC, 1990)	Cierre vial total o parcial por obstrucción en la vía por desplazamiento de tierra y rocas sobre la carretera (UNGRD, 2020).	Agrietamiento de la estructura por el aumento de la humedad (MOPC, 1990). Perdida de estabilidad por aumento de la humedad (MOPC, 1990).	Agrietamiento de la estructura por cambios en la humedad (MOPC, 1990). Calentamiento del pavimento, lo cual puede generar daños a los vehículos que transitan la vía (L. Maldonado, 2016).	Puede facilitar el craqueo y rotura de pavimentos (FHWA, 2018)	Agrietamiento de la estructura por el aumento de la humedad (MOPC, 1990). Perdida de estabilidad por aumento de la humedad
Rodamiento - Pavimento Rígido	Impacto Alto:	Fracturamiento del concreto por el debilitamiento de la estructura debido al bombeo (MOPC, 1990).	Pérdida total o parcial de estructura por deslizamiento de talud (UNGRD, 2020). Arrastre de la estructura en el movimiento de tierra que puede llegar afectar infraestructura	Fracturamiento del concreto por el debilitamiento de la estructura debido al bombeo (MOPC, 1990).			Falla estructural o desintegración de las placas de concreto debido al movimiento de aguas sobre la capa de pavimento (MOPC, 1990).

			adyacente, vehículos y personas (UNGRD, 2020).				
	Impacto Medio:	Degradación de concreto por retención de agua. Pérdida de estabilidad por aumento de la humedad en las capas de subbase, base y subrasante (MOPC, 1990) Cierre vial por altura de lámina de agua Impacto Bajo:	Deformaciones en la estructura por cambios en el terreno.	Degradación de concreto por retención de agua. Pérdida de estabilidad por aumento de la humedad en las capas de subbase, base y subrasante (MOPC, 1990) Cierre vial por altura de lámina de agua	Deformaciones permanentes debido a expansión térmica en juntas (MOPC, 1990). Fisuramiento del concreto por cambios bruscos de temperatura (MOPC, 1990).	Flujo de escombros que generen cierre vial hasta que se retire el material de la vía. (FHWA, 2016)	Deformaciones permanentes por el ingreso de agua a las capas estructurales del pavimento (MOPC, 1990). Cierre vial por altura de lámina de agua.
	Impacto bajo:	Deslave de material granular de carpetas de subbase, base y subrasante que pueda generar bombeo entre las placas de concreto (MOPC, 1990).	Cierre vial total o parcial por obstrucción en la vía por desplazamiento de tierra y rocas sobre la carretera (UNGRD, 2020).	Deslave de material granular de carpetas de subbase, base y subrasante que pueda generar bombeo entre las placas de concreto (MOPC, 1990).	Calentamiento del pavimento, lo cual puede generar daños a los vehículos que transitan la vía (L. Maldonado, 2016).	Agrietamiento de la estructura por cambios en la humedad (MOPC, 1990).	Agrietamiento de la estructura por el aumento de la humedad (MOPC, 1990). Perdida de estabilidad por aumento de la humedad (MOPC, 1990) Lavado de finos por infiltración en capas de base y subbase.
Rodamiento - Pavimento placa - huella	Impacto Alto:	Fracturamiento del concreto por el debilitamiento de la estructura debido al bombeo (MOPC, 1990).	Pérdida total o parcial de estructura por deslizamiento de talud (UNGRD, 2020). Arrastre de la estructura en el movimiento de tierra que puede llegar afectar infraestructura adyacente, vehículos y	Fracturamiento del concreto por el debilitamiento de la estructura debido al bombeo (MOPC, 1990).			Falla estructural o desintegración de las placas de concreto debido al movimiento de aguas sobre la capa de pavimento (MOPC, 1990).

			personas (UNGRD, 2020).				
	Impacto Medio:	Degradación de concreto por retención de agua. Pérdida de estabilidad por aumento de la humedad en las capas de subbase, base y subrasante (MOPC, 1990). Cierre vial por altura de lámina de agua	Deformaciones en la estructura por cambios en el terreno	Degradación de concreto por retención de agua. Pérdida de estabilidad por aumento de la humedad en las capas de subbase, base y subrasante (MOPC, 1990).	Deformación permanente debido a la variación térmica y cambios en la humedad de las capas (MOPC, 1990). Fisuramiento del concreto por cambios bruscos de temperatura (MOPC, 1990).	Flujo de escombros que generen cierre vial hasta que se retire el material de la vía. (FHWA, 2016)	Deformaciones permanentes por el ingreso de agua a las capas estructurales del pavimento (MOPC, 1990). Cierre vial por altura de lámina de agua.
	Impacto bajo:	Deslave de material granular de carpetas de subbase, base y subrasante que pueda generar bombeo entre las placas de concreto (MOPC, 1990)	Cierre vial total o parcial por obstrucción en la vía por desplazamiento de tierra y rocas sobre la carretera (UNGRD, 2020).	Deslave de material granular de carpetas de subbase, base y subrasante que pueda generar bombeo entre las placas de concreto (MOPC, 1990). Cierre vial por altura de lámina de agua.		Agrietamiento de la estructura por cambios en la humedad (MOPC, 1990).	Agrietamiento de la estructura por el aumento de la humedad (MOPC, 1990). Perdida de estabilidad por aumento de la humedad (MOPC, 1990) Lavado de finos por infiltración en capas de base y subbase.
Rodamiento - Pavimento Articulado	Impacto Alto:	Erosión o arrastre de las piezas concreto por el debilitamiento de la estructura debido al bombeo.	Pérdida total o parcial de estructura por deslizamiento de talud (UNGRD, 2020). Arrastre de la estructura en el movimiento de tierra que puede llegar afectar infraestructura adyacente, vehículos y personas (UNGRD, 2020).	Erosión o arrastre de las piezas concreto por el debilitamiento de la estructura debido al bombeo (MOPC, 1990).			Erosión o arrastre de las piezas concreto por el debilitamiento de la estructura debido al bombeo. (MOPC, 1990).

	Impacto Medio:	Deformaciones permanentes por el ingreso de agua a las capas estructurales del pavimento (MOPC, 1990). Degradación de concreto por retención de agua (MOPC, 1990).	Deformaciones o fallas en la estructura por cambios en el terreno.	Deformaciones permanentes por el ingreso de agua a las capas estructurales del pavimento (MOPC, 1990). Cierre vial por altura de lámina de agua.	Deformación permanente debido a la variación térmica y cambios en la humedad de las capas (MOPC, 1990). Fisuramiento del concreto por cambios bruscos de temperatura (MOPC, 1990)	Flujo de escombros que generen cierre vial hasta que se retire el material de la vía. (FHWA, 2016)	Perdida de material por exposición constante a flujos de agua (Higuera y Pacheco, 2010). Perdida de estabilidad por aumento de la humedad (MOPC, 1990). Deformaciones permanentes por el ingreso de agua a las capas estructurales del pavimento (MOPC, 1990).
	Impacto bajo:	Perdida de estabilidad por aumento de la humedad. Fracturamiento y perdida de material por exposición constante a flujos de agua (Higuera y Pacheco, 2010). Cierre vial por altura de lámina de agua.	Cierre vial total o parcial por obstrucción en la vía por desplazamiento de tierra y rocas sobre la carretera (UNGRD, 2020).	Perdida de estabilidad por aumento de la humedad (MOPC, 1990). Fracturamiento y perdida de material por exposición constante a flujos de agua (Higuera y Pacheco, 2010).		Puede generar condiciones inadecuadas para el tránsito de vehículos. (FHWA,2018)	Corrosión de elementos en acero y deterioro en elementos de concreto. (D. Gómez & E. Muñoz, 2013)
Rodamiento - Afirmado	Impacto Alto:		Pérdida total o parcial de estructura por deslizamiento de talud (UNGRD, 2020). Arrastre de la estructura en el movimiento de tierra que puede llegar afectar infraestructura adyacente, vehículos y personas (UNGRD, 2020).				
	Impacto Medio:	Deformaciones permanentes por el ingreso de agua a las capas	Cierre vial total o parcial por obstrucción en la vía por desplazamiento de	Deformaciones permanentes por el ingreso de agua a las capas estructurales	Genera desprendimientos de materia granular por falta de humedad que	Flujo de escombros que generen cierre vial hasta que se retire	Deformaciones permanentes por el ingreso de agua a las capas estructurales

		estructurales del pavimento (MOPC, 1990). Cierre vial por altura de lámina de agua.	tierra y rocas sobre la carretera (UNGRD, 2020).	del pavimento (MOPC, 1990). Cierre vial por altura de lámina de agua (MOPC, 1990).	debilita la carpeta. (FHWA,2018).	el material de la vía. (FHWA, 2016)	del pavimento (MOPC, 1990).
	Impacto bajo:	Perdida de estabilidad por aumento de la humedad (MOPC, 1990).		Perdida de estabilidad por aumento de la humedad (MOPC, 1990).		Puede generar condiciones inadecuadas para el tránsito de vehículos. (FHWA,2018).	Perdida de estabilidad por aumento de la humedad (MOPC, 1990).
Estructuras de contención - Diques de contención	Impacto Alto:	Falla estructura por rompimiento o desbordamiento cuando aumenta la altura de las aguas (Corporación OSSO, 2013).	Volcamiento o hundimiento por un flujo considerable de tierra y acción de cargas dinámicas, sobre superficie de deslizamiento o debilitada (O. Silva, 2024).	Falla estructura por rompimiento o desbordamiento cuando aumenta la altura de las aguas (Corporación OSSO, 2013).			
	Impacto Medio:	Asentamientos importantes debido a la filtración de aguas en la estructura (Corporación OSSO, 2013).	Deformación permanente o parcial por flujo considerable y acción de cargas dinámicas (O. Silva, 2024).	Asentamientos importantes debido a la filtración de aguas en la estructura (Corporación OSSO, 2013).			Erosión y desgaste en el material del muro debido a la fuerza del impacto de olas, o a inundaciones constantes.
	Impacto bajo:	Socavación en la fundación del dique por el nivel de aguas (Corporación OSSO, 2013)		Sedimentación de materiales constructivos por acción del agua (Corporación OSSO, 2013). Socavación en la fundación del dique por el nivel de aguas (Corporación OSSO, 2013).			Socavación en el fondo que puede debilitar la fundación de la estructura (EzDOCK, 2022).
Estructuras de contención - Muros de Gaviones	Impacto Alto:	Volcamiento o hundimiento por debilitamiento del suelo de fundación debido a la acción del agua (R. Piñar,	Volcamiento o hundimiento por un flujo considerable de tierra y acción de cargas dinámicas, sobre superficie de	Volcamiento o hundimiento por debilitamiento del suelo de fundación debido a la acción del agua (R. Piñar, 2008).			Volcamiento o hundimiento por debilitamiento del suelo de fundación

		2008). Rotura de la malla por el arrastre de sedimentos y flujo de agua.	deslizamiento o debilitada (O. Silva, 2024). Falla de estabilidad interna por esfuerzo excesivos debido a cargas de empuje por deslizamiento de tierra (R. Piñar, 2008).	Rotura de la malla por el arrastre de sedimentos y flujo de agua.			debido a la acción del agua (R. Piñar, 2008).
	Impacto Medio:	Socavación en el fondo que puede debilitar la fundación de la estructura (EzDOCK, 2002).		Socavación en el fondo que puede debilitar la fundación de la estructura (EzDOCK, 2002).			Socavación en el fondo que puede debilitar la fundación de la estructura (EzDOCK, 2002).
	Impacto bajo:	Erosión o desprendimiento de finos por el flujo de agua (R. Piñar, 2008). Corrosión de elementos estructurales por acción de fenómenos climatológicos extremos.		Erosión o desprendimiento de finos por el flujo de agua (R. Piñar, 2008). Corrosión de elementos estructurales por acción de fenómenos climatológicos extremos.			Erosión o desprendimiento de finos por el flujo de agua (R. Piñar, 2008). Corrosión del recubrimiento de la canasta debido a la infiltración de agua salada (SHA, 2014)
Estructuras de contención - Muros de Gravedad en Concreto	Impacto Alto:	Falla estructural por asentamiento, o por deterioro de la estructura debido a los efectos de las inundaciones frecuentes o excesivas (Guarín, 2018). Volcamiento de la estructura debido a la socavación de la cimentación provocada por la acción del agua. Rotura del muro por	Volcamiento o hundimiento por un flujo considerable de tierra y acción de cargas dinámicas, sobre superficie de deslizamiento o debilitada (O. Silva, 2024). Rotura de la estructura debido al movimientos de tierra	Falla estructural por arrastre de la estructura (O. Silva, 2024). Volcamiento de la estructura debido a la socavación de la cimentación provocada por la acción del agua. Rotura del muro debido al arrastre de sedimentos por el descargue de aguas.	Falla por Fisuramiento excesivo debido al cambio brusco de temperatura y la contracción de concreto (O. Silva, 2024).		Falla estructural debido a oleaje de alta presión, marejadas de tormenta (EzDOCK, 2022).

		inestabilidad de taludes debido a la acumulación de aguas.					
	Impacto Medio:	Socavación y fallas en la cimentación del muro debido a la saturación del agua (Guarín, 2018). Fisuración en muros de concreto por filtración de agua (I. Pérez, 2014). Desplazamiento de la estructura debido a cambios en el suelo de cimentación por aumento de humedad (Guarín, 2018).	Deformación permanente o parcial por flujo considerable y acción de cargas dinámicas (O. Silva, 2024).	Socavación y fallas en la cimentación del muro debido a la saturación del agua (Guarín, 2018). Fisuración en muros de concreto por filtración de agua (I. Pérez, 2014). Desplazamiento de la estructura debido a cambios en el suelo de cimentación por aumento de humedad (Guarín, 2018).	Agrietamiento por retracción y dilatación frente a cambios bruscos de temperatura (O. Silva, 2024).		Erosión y desgaste en el material del muro debido a la fuerza del impacto de olas, o a inundaciones constantes. Socavación en el fondo que puede debilitar la fundación de la estructura (EzDOCK, 2022).
	Impacto bajo:	Deterioro de los materiales constructivos del muro (I. Pérez, 2014). Deformación permanente o parcial de la estructura por filtración debida a un mal drenaje o drenaje insuficiente.		Deterioro de los materiales constructivos del muro (I. Pérez, 2014). Deformación permanente o parcial de la estructura por filtración debida a un mal drenaje o drenaje insuficiente.			

Estructuras de contención - Muros en Concreto reforzado	Impacto Alto:	Falla estructural por asentamiento, o por deterioro de la estructura debido a los efectos de las inundaciones frecuentes o excesivas (Guarín, 2018). Volcamiento de la estructura debido a la socavación de la cimentación provocada por la acción del agua. Rotura del muro por inestabilidad de taludes debido a la acumulación de aguas.	Volcamiento o hundimiento por un flujo considerable de tierra y acción de cargas dinámicas, sobre superficie de deslizamiento o debilitada (O. Silva, 2024).	Falla estructural por asentamiento, o por deterioro de la estructura debido a los efectos de las inundaciones frecuentes o excesivas (Guarín, 2018). Volcamiento de la estructura debido a la socavación de la cimentación provocada por la acción del agua. Rotura del muro debido al arrastre de sedimentos por el descargue de aguas.	Falla por Fisuramiento excesivo debido al cambio brusco de temperatura y la contracción de concreto (O. Silva, 2024).		Falla estructural debido a oleaje de alta presión, marejadas de tormenta (EzDOCK, 2022). Rotura del muro debido al arrastre de sedimentos por el descargue de aguas.
	Impacto Medio:	Socavación y fallas en la cimentación del muro debido a la saturación del agua (Guarín, 2018). Fisuración en muros de concreto por filtración de agua (I. Pérez, 2014). Desplazamiento de la estructura debido a cambios en el suelo de cimentación por aumento de humedad (guarín, 2018).	Deformación permanente o parcial por flujo considerable y acción de cargas dinámicas (O. Silva, 2024).	Socavación y fallas en la cimentación del muro debido a la saturación del agua (guarín, 2018). Fisuración en muros de concreto por filtración de agua (I. Pérez, 2014). Desplazamiento de la estructura debido a cambios en el suelo de cimentación por aumento de humedad (guarín, 2018).	Agrietamiento por retracción y dilatación frente a cambios bruscos de temperatura (O. Silva, 2024).		Erosión y desgaste en el material del muro debido a la fuerza del impacto de olas, o a inundaciones constantes. Socavación en el fondo que puede debilitar la fundación de la estructura (EzDOCK, 2022).
	Impacto bajo:	Deterioro de los materiales constructivos del muro (I. Pérez, 2014). Deformación		Deterioro de los materiales constructivos del muro (I. Pérez, 2014). Deformación permanente o parcial			Erosión o desprendimiento de finos por el flujo de agua (R. Piñar, 2008). Corrosión del acero estructural debido a

		permanente o parcial de la estructura por filtración debida a un mal drenaje o drenaje insuficiente.		de la estructura por filtración debida a un mal drenaje o drenaje insuficiente.			la infilitración de agua salada (SHA, 2014)
Estructuras de contención - Pantallas	Impacto Alto:	Falla estructural por asentamiento, o por deterioro de la estructura debido a los efectos de las inundaciones frecuentes o excesivas (guarín, 2018). Rotura del muro por inestabilidad de taludes debido a la acumulación de aguas.	Volcamiento o hundimiento por un flujo considerable de tierra y acción de cargas dinámicas, sobre superficie de deslizamiento o debilitada (O. Silva, 2024).	Falla estructural por asentamiento, o por deterioro de la estructura debido a los efectos de las inundaciones frecuentes o excesivas (Guarín, 2018).	Falla por Fisuramiento excesivo debido al cambio brusco de temperatura y la contracción de concreto (O. Silva, 2024).		Falla estructural debido a oleaje de alta presión, marejadas de tormenta (EzDOCK, 2022).
	Impacto Medio:	Socavación y fallas en la cimentación del muro debido a la saturación del agua (Guarín, 2018). Fisuración en muros de concreto por filtración de agua (I. Pérez, 2014). Desplazamiento de la estructura debido a cambios en el suelo de cimentación por aumento de humedad (Guarín, 2018).	Deformación permanente o parcial por flujo considerable y acción de cargas dinámicas (O. Silva, 2024).	Socavación y fallas en la cimentación del muro debido a la saturación del agua (Guarín, 2018). Fisuración en muros de concreto por filtración de agua (I. Pérez, 2014). Desplazamiento de la estructura debido a cambios en el suelo de cimentación por aumento de humedad (Guarín, 2018).	Agrietamiento por retracción y dilatación frente a cambios bruscos de temperatura (O. Silva, 2024).		Erosión y desgaste en el material del muro debido a la fuerza del impacto de olas, o a inundaciones constantes. Socavación en el fondo que puede debilitar la fundación de la estructura (EzDOCK, 2022).
	Impacto bajo:	Deterioro de los materiales constructivos del muro (I. Pérez, 2014). Deformación permanente o		Deterioro de los materiales constructivos del muro (I. Pérez, 2014).			

		parcial de la estructura por filtración debida a un mal drenaje o drenaje insuficiente.					

El objetivo de este resultado o insumo ofrecido por los dos capítulos iniciales es ofrecer un panorama general del impacto que los fenómenos de origen natural puedan causar a la infraestructura existente, y en base de eso concebir opciones de adaptación. Estos impactos como se mencionó anteriormente son la recopilación de los impactos encontrados en la literatura para cada estructura, y pueden ser complementados con investigaciones posteriores que diluciden el panorama mucho mejor, frente a más eventos, o estructuras, o impactos asociados. Esto como una invitación al desarrollo de una investigación adicional en la materia.

9.4. CAPITULO 4: PILOTOS DE ADAPTACIÓN:

El cambio climático y la variabilidad climática plantean escenarios donde los eventos climáticos que conocemos se intensifiquen y aumente su impacto en la infraestructura. Es por esta razón, que el objetivo a futuro debe ser la búsqueda de la adaptación del sistema carretero, y la resiliencia para que pueda resistir el impacto de estos cambios que se esperan.

9.4.1. Pilotos de adaptación Nacionales:

Se desarrolla una revisión documental de las acciones desarrolladas por el país en materia de adaptación de carreteras frente al cambio climático y variabilidad climática con el fin de visualizar el panorama general de las acciones llevadas a cabo por Colombia para actuar frente estado actual, y los cambios que se avecinan según las proyecciones que el IDEAM comparte en su tercera comunicación sobre el cambio climático.

Para resaltar las acciones tomadas por el País, bajo el decreto 4819 del 2010 y durante la emergencia vivida por el fenómeno de La Niña en el 2010-2011, se creó el Fondo Nacional de Adaptación con el fin de recuperar, reconstruir las zonas afectadas y construir políticas e infraestructura en las zonas afectadas por estos fenómenos hidrometeorológicos. Según el FEDESARROLLO (2019), hasta el 2019 Fondo ha realizado intervención en 28 departamentos, con 1922 proyectos en transporte y vivienda.

9.4.1.1. Estudio caso: Interconexión Yati - La Bodega (Bolívar):

La Mojana y la depresión Momposina se conforma por ciénagas, caños y humedales. Esta particular orografía generó que la depresión Momposina se mantuviera aislada de otras regiones en vía terrestre, y su principal acceso era por medio de transporte fluvial y solo en horas diurnas con elementos como el Ferry. Así mismo, permitió que se basaran en este medio de transporte las dinámicas económicas, turísticas y sociales. Haciendo la zona particularmente susceptible al cambio climático.

Esta obra permite la conexión entre los municipios de Magangué, Talaiga Nuevo, Mompós, Cicuco y el corregimiento de la Bodega. Un punto bastante importante es que Magangué es un centro económico de gran importancia para la región y debido a la complejidad de geográfica de la zona también se convierte en el centro fluvial de mayor relevancia, debido a su posición entre los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge. Además, el municipio de Mompós es patrimonio de la humanidad, dándole un atractivo turístico que puede ayudar a un mayor desarrollo económico en la región, pero que durante años estuvo desconectado por la complejidad de transporte y el Ferry como medio para acceso a la isla.

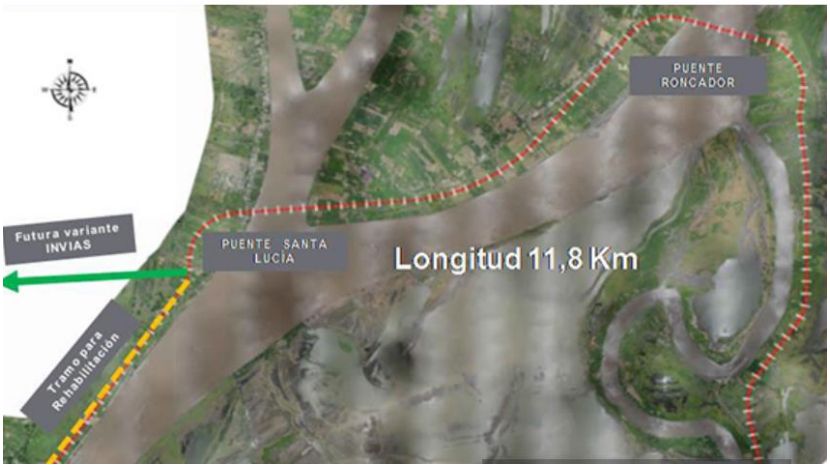


Figura 45. interconexión vía Yati - La Bodega

Fuente: Revista Zetta, 2015.

Es una interconexión de 12 kilómetros, que se encarga de conectar dos arterias de mayor importancia para el país, la ruta del sol y la troncal de occidente a través de la vía existente Yati -Magangué – Puerta de Hierro. La interconexión contiene el puente Santa Lucia de 16 metros de alto y 1 km de distancia de Yati -Magangué a Isla Grande; Una vía de 2,7km en Isla Grande que conectara el puente de Santa Lucia con el Puente Roncador, construido sobre terraplenes y obras de drenaje correspondientes. La segunda estructura representativa es El puente Roncador de 2,3 Km de Isla Grande a La Bodega, sobre el brazo de Loba del rio Magdalena, y la carretera a Isla Grande de 2,9 km que conecta el puente Roncador y el puerto de La Bodega.

Figura 46. Vista aérea de la Interconexión Yatí - La Bodega

Fuente: Empresas el Universal, 2018.

La depresión Momposina es particularmente a los fenómenos hidrometeorológicos, según la información recopilada por el Banco de Occidente (2023), los periodos de La Niña 2010 -2011 y 2021-2023 generaron inundaciones que afectaron más de 270000 personas en el territorio de la Mojana. Sin embargo, las épocas húmedas no son el unico reto que presenta la región, ya que en sequias el nivel de agua baja y propiciando el arrastre de sedimentos cuando suben las aguas. De acuerdo, a los datos de la UNGRD y el IDEAM poseen en sus mapas de inundación, la depresión Momposina es la zona inundable más grande del país, y de alta amenaza. Razón por la cual, la construcción de la interconexión es que en épocas de lluvias las comunidades no queden

incomunicadas, la economía no se vea afectada por el cierre de sus vías o el colapso de estructuras, y además se reduzcan los tiempos de espera para atravesar el rio Magdalena, que en el pasado se haría por medio del Ferry.

El proyecto incorpora el diseño de cotas para evitar daños por inundaciones, con vías sobre terraplén de 3,5 de altura, y el uso de la técnica de mecha drenante, para acelerar la consolidación del suelo en la proximidad de los terraplenes en los tramos viales, con el fin de asegurar su estabilidad (FEDESARROLLO, 2019). Estos geocompuestos hincados verticalmente en terrenos altamente cohesivos como limos, arcillas, arcillas orgánicas, turba y fangos, drenan el agua y ayudan disminuir tiempos de asentamiento y mejora las propiedades de resistencia al corte (Terratest Colombia, 2023).

También se destaca la altura de los puentes, definidas para el desarrollo del Rio Magdalena y manteniendo el curso del agua, y el transporte fluvial. Una de las fortalezas mencionadas por FEDESAROLLO en el documento de lecciones aprendidas en proyectos de infraestructura resiliente a impactos del cambio climático, es la realización de estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo presentes y futuros ocasionados por Fenómenos de origen natural desencadenados por eventos Hidrometeorológicos. Estos estudios deben tener en cuenta lluvias y caudales en la zona, en un periodo no menos a 100 años.

9.4.1.2. Retos y recomendaciones:

Debemos resaltar que la ola invernal 2010-2011 debido al fenómeno de La Niña dejo un antes y un después para el país y sus sectores, las vidas perdidas y los damnificados debido a la emergencia son un punto de desarrollo para la creación de mecanismos que mitiguen la amenaza a la que el territorio esta expuesta, y a las dinámicas climáticas con las se deberán convivir en seguimiento al cambio climático y la variabilidad climática. La información extraída por el Fondo de Adaptación sobre la interconexión Yatí – La Bodega, busca en este orden, demostrar la importancia de la conexión de comunidades a través de infraestructura resiliente.

De acuerdo con datos de la cámara de comercio de Magangué (Borré, 2020) la necesidad de una herramienta que proporcionara conexión entre los territorios de la Mojana fue anterior incluso al evento de La Niña 2010 – 2011, pero fue tras este en el que se evidencia la necesidad de una solución definitiva y que cumpliera con la conexión ininterrumpidamente, a diferencia del Ferry que cerraba en la noche y cuando la navegación por el rio era peligrosa, que se comienzan estudios para la construcción de un puente 2011 en acompañamiento del INVIAS. Sin embargo, se suspendió en 2012 por falta de licencias ambientales cuando ya se contaba con el diseño preliminar, además de algunos errores cometidos por la Gobernación de Bolívar al asociarlo con un proyecto descartado años antes. Con nuevos diseños en los que se estructuraban dos puentes, el proyecto fue retomado sobre el 2013 por el Consorcio Santander que había cambiado el diseño para reducir los costos, frente a esto la cámara de comercio entablo comunicaciones con el Gobierno Nacional y la presidencia trajo al fondo nacional de Adaptación entregando los diseño y diagnósticos ambientales al Consorcio Nacional Yati, que en el 2015 firma la construcción y en el 2020 su entrega al INVIAS.

El proyecto no solo fue construido teniendo en cuenta el factor climático y periodos de retorno de 100 años tanto en precipitaciones como caudales, sino que también uso tecnología de mechas drenantes asegurando una consolidación del terreno en menor tiempo, según FEDESARROLLO (2018). Esto es importante, ya que se hace el uso de escenarios crítico para el desarrollo de la obra y el establecimiento de parámetros de construcción que permitirá que resistan dichos escenarios, esto se evidencia en la elevación de la vía sobre el terreno, y la consideración de intervenir el cauce de la menor manera posible asegurando que el transporte fluvial del cual se benefician algunas dinámicas económicas no se descartara. Asi que, en cuanto técnica,

Colombia empieza a avanzar sobre la importancia de entender, aplicar y construir en base a herramientas que permitan adaptarse al Cambio Climático, y de integrar todo esto a la gestión de riesgos de desastres. El cumplimento de esto depende de asegurar que se realicen estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo que a lo que deben apostar cada proyecto de infraestructura.

La incorporación de entidades como el Fondo de Adaptación es un acierto, ya que como se mencionó antes, debe existir la integración de la Adaptación al Cambio Climático - ACC y Gestión de Riesgos de Desastres – GRD, trabajar por una entidad que implemente medidas de adaptación al clima en proyectos de infraestructura vial y no solo a la atención de emergencias derivadas de ellas, actuar desde la prevención. Si bien la nación presenta un avance importante en política publica y normativa, y la incorporación en planes de gestión, todavía evidencia un rezago importante en investigación y desarrollo de tecnología, además de proyectos que consideren el uso de esta información.

Asi mismo presenta un reto importante frente a las obras de esta envergadura en cuanto a la planeación, y la organización. El caso estudio refleja un ejemplo de la dilatación del proceso presentado por la falta de documentación, análisis y errores que pudieron terminar por evitar que la construcción se realizara. Debe haber una mejora en la planeación y el desarrollo de obras, además de asegurar la articulación de organismos públicos y privados en proyectos de infraestructura vial y contar con profesionales que puedan aportar conocimiento y experiencia en la materia.

Finalmente, como recomendación y reto, asegurar la información disponible y generar mayor investigación en la materia es una herramienta importante para que se desarrollen carreteras resilientes al cambio y la variabilidad climática. Así también, la actualización de información existente en estado de vías, usos de suelos, información climática y zonas vulnerables, esto de manera que se ofrezcan herramientas importantes para enfrentar el desarrollo de nuevas obras y poder adaptar las existentes.

9.4.2. Pilotos de adaptación Internacionales:

Se realiza la recuperación de información de pilotos de adaptación de carreteras realizadas internacionalmente que pueda plantear opciones de resiliencia frente al cambio climático, y que pueden integrarse al manejo de impactos en el contexto nacional los beneficios, oportunidades y retos que representan a las zonas que presentan mayor vulnerabilidad en el país. Esta revisión bibliográfica se realizó desde fuentes como la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos - FHWA, que posee proyectos que evaluados en zonas donde han encontrado mayor vulnerabilidad a impactos climáticos.

Los cinco pilotos escogidos, se tomaron como una representación de lo que impactos como inundaciones, deslizamientos, incendios forestales y aumentos del nivel del mar, pueden generar a la infraestructura. Para los dos primeros representan una manera de atender las necesidades frente a los dos eventos de mayor impacto para el país cuando las épocas de lluvias se ven intensificadas. Los otros dos eventos se tomaron como parte del descubrimiento y entendimiento de impacto de aumentos de temperatura en la región.

9.4.2.1. Estudio de caso: Canyon Cove Lane, Colorado.

El estudio se centró en una alcantarilla tipo (Box Coulvert) a lo largo de la US 34 en Colorado, sobre un tramo de carretera que sufrió fuertes daños por las inundaciones de 2013 y que se encuentra en proceso de reconstrucción y que a lo largo de su historia ha sufrido inundaciones continuamente, además de que la zona presenta amenaza por incendios forestales.

Se trabajó en el estudio con una alcantarilla de dos celdas de 8 pies x 5 pies en concreto, con un diseño para un caudal de 25 años de tormenta. Como historial se tiene que para 1976, se dio una descarga de 31.200 pies cúbicos por segundo, conocida como la más alta durante una fuerte tormenta eléctrica con una duración de 6 horas, y que causó daños a lo largo de la carretera US 34, incluido el Box Coulvert de estudio. En el 2013, una tormenta que duro varios días y cuyo volumen total de precipitación alcanzo los 66cm, y superó la inundación de 1976 con una descarga de 208.356 pies cúbicos.

En cuanto a incendios, Colorado tiene un total de 2000 eventos registrados, que desde 1960 han aumentado considerablemente, de los cuales corresponde a factores ambientales y antropológicos, y además al aumento de temperatura y condiciones climáticas. El equipo estudio dos casos recientes en el 2012, catalogados como los más destructivos en la historia del estado: El incendio en High Park sobre la ruta estatal 14 y El incendio de Waldo Canyon en la carretera US 34. Hasta el 2014 que finalizan las mejoras siete tormentas provocaron las alcantarillas se obstruyeran por el flujo de escombros, y estas se desbordaran. La construcción de tres captadores de sedimentos, cámaras de monitoreo y el reemplazo de una de las alcantarillas en el US 34, lograron reducir y mitigar el impacto de las inundaciones. Sin embargo, el diseño realizado un caudal de tormenta 10 y sobre el estándar generó que las inundaciones se trasladaran, lo que implicó que en tres años se requirieran en promedio de cinco a siete limpiezas cada año.

Es por eso, que se realizó un estudio para determinar medidas de adaptación sobre el activo a través del estudio de investigación que constaba en un primer momento de conocer el contexto de la zona en materia de inundaciones sobre la carretera, y el historial de los incendios forestales en Colorado. Una vez conocida esta información, se procedió con la documentación/caracterización del activo en este caso un Box Coulvert en la ruta US 34 que presentó daños con la inundación del 2013.

Las modelaciones para entender los escenarios en este caso tuvieron en cuenta los escenarios RCP's 4.5, 6.0 y 8.5 sobre los cuales se modelo temperatura máxima y mínima, precipitaciones de 1950 a 2099. Además, se consideraron los periodos de retorno de precipitaciones para la investigación, por lo cual se estudió la precipitación máxima en 24hr, y los intervalos analizados de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. De 33 simulaciones diseñadas se seleccionaron 3, de acuerdo con los percentiles 10, 50 y 90, considerando que representaban bien la dispersión de los datos además de la representación de los escenarios.

Siendo la simulación 1 el escenario de baja precipitación, donde se muestra una disminución de lluvias y la que tiene mayor riesgo de aumento de incendios forestales; la simulación 2 sería un escenario moderado, donde las precipitaciones tiene un aumento moderado, y existe un grado moderado de riesgo por incendios forestales; y la simulación 3 donde existe un incremento elevado de precipitaciones, pero el índice de sequía es bajo, por lo cual el riesgo es de incendios forestales es bajo.

Debido a la complejidad que aborda la proyección de los incendios forestales, para lo que eligieron un índice que pudiera proyectar el potencial de ocurrencia de los incendios forestales, y este es el índice de Sequía, utilizado ampliamente como indicador para amenazas de incendios forestales en ubicaciones determinados, y que para investigaciones climáticas resulta útil debido a que usa variables como precipitación anual, diaria y temperatura máxima, y estas fueron tenidas en cuenta dentro de los escenarios de simulación escogidos.

Para la relación del flujo de sedimentos se modelaron dos condiciones en la cuenca uno con la cobertura natural existente y otro con acumulación de sedimentos tras un incendio forestal, a las cuales se les proyecta el valor del flujo por escorrentía en la cuenca bajo las tres simulaciones obtenidas anteriormente.

De acuerdo con la información de la activo, la estructura actual está diseñada para transportar y confinar el flujo de 25 a 50 años, si las condiciones no superan los 4000 pies cúbicos por segundo. Actualmente es de 1150 pies cúbicos por segundo, y dentro de las condiciones de tormenta se esperan 839 pies cúbicos por segundo. En el escenario de mayor impacto para la precipitación 2070-2100, con una quema de incendios forestales, el caudal de tormenta de 50 años es de 5115 pies cúbicos por segundo, por lo cual la estructura se desbordaría. Además, bajo condición de un incendio forestal, cuando el flujo de escombros se acerque al cruce de la US 34 y produzca un flujo de que supere los 450 pies cúbicos por segundo, en base a las dimensiones de entrada y salida de Box Coulvert el equipo encontró que sería fácilmente obstruida y degradaría el canal.

El equipo de investigación encontró lo siguiente:

- La inclusión de los impactos de incendios forestales en la cobertura terrestre de la cuenca incrementa el volumen proyectado de la escorrentía de la cuenca por las precipitaciones.
- El flujo de escombros y sedimentos impacta en rendimiento del sistema hidráulico tanto por acumulación de estos en los flujos máximos como en el depósito en la alcantarilla de la US 34.
- El box Coulvert existente posee los criterios de diseño para trabajar con el caudal de tormenta actual, sin embargo, debido a las condiciones de cambio climático, tanto la sequía como las lluvias son condiciones climáticas que tenderán al aumento conforme avance el tiempo, por lo cual tras un evento de incendio estas podrían perjudicar el rendimiento de la alcantarilla actual.
- Los eventos de incendio forestal tienen una alta complejidad para la predicción de ocurrencia, es por ellos que se usa el índice de sequía como una manera de predecir el potencial de ocurrencia del evento. Por lo que, aunque se puedan usar como referencia no es una proyección a futuro de que ocurra y eso podría desestimar si es necesaria la opción de adaptación.

Es por eso que para caso se desarrollan 3 opciones de adaptación proactivas que se describen a continuación con sus ventajas y desventajas:

Tabla 9. Opciones de Adaptación, Caso de estudio Canyon Cove Lane

Opciones de Adaptación	Ventajas	Desventajas
Opción 1: Construcción de un puente, y una elevación de terreno de 4 pies para la carretera, con una longitud de 50 pies.	Mayor resistencia a los escenarios críticos para el periodo de 50 años. Menor potencial de sedimentación debido al aumento de la sección del canal. Practicidad y facilidad para para el mantenimiento y limpieza. Mayor resistencia a las obstrucciones causadas por desechos leñosos que arrastre la corriente.	Presente un alto costo de construcción. Genera afectaciones socioeconómicas por el cierre total de la carretera. El mantenimiento e inspección semestral es más costoso que el de una alcantarilla.

Opción 2: Reemplazo de la alcantarilla por una doble de ocho pies por ocho pies.	El costo de construcción y mantenimiento es de las tres opciones principales, las de menor coste. Cumple con las condiciones de flujo actual y satisface las de futuras. No requiere inspección semestral. No generaría afectaciones socioeconómicas, ya que no se cerraría la carretera.	En el diseño no se contempla el escenario de incendios forestales. En eventos de fuerte tormenta puede presentarse acumulación de sedimentos que deterioren la estructura. Debido a que no contempla escenario de incendios forestales se pueden producir desbordamientos y obstrucciones debido al arrastre de sedimentos.
Opción 3: Reemplazo de la alcantarilla por una doble de ocho pies por ocho pies, y la adición de un cajón de ocho por ocho.	Tiene un costo de construcción bajo. En el diseño se contempló el escenario de incendios forestales. No generaría afectaciones socioeconómicas, ya que no se cerraría la carretera. El mantenimiento es más económico que el de un puente.	La estructura no contempla escenarios críticos. Aunque cumple con condiciones de flujo actual y futuras.
Opción Reactiva x: *Reemplazo de la alcantarilla por una doble de ocho pies por ocho pies***.** *Si se da un evento de incendio forestal y tormenta* - Se adiciona el tercer cajón.	El costo de construcción y mantenimiento es de las tres opciones principales, las de menor coste. Cumple con las condiciones de flujo actual y satisface las de futuras. No requiere inspección semestral. No generaría afectaciones socioeconómicas, ya que no se cerraría la carretera.	En el diseño contempla el escenario de incendios forestales, post incidente al agregar el tercer cajón. En eventos de fuerte tormenta puede presentarse acumulación de sedimentos que deterioren la estructura. Mientras se adapte el tercer cajón puede producirse desbordamientos u obstrucciones.
Opción Reactiva y: *No alterar la estructura* - Construir dispositivos de contención de flujos y atenuación de caudales máximos con tratamientos distribuidos (Captadores de escombros, Valla de Limo, Barreras de erosión contra troncos, hidromulch/siembra y comprobación de presas).	De las opciones reactivas, tiene el costo de construcción más bajo. No generaría afectaciones socioeconómicas, ya que no se cerraría la carretera en medio de la instalación. El mantenimiento es el más económico de todas las opciones.	El uso de esta estructura se basa en la presunción de un incendio forestal, y que cualquiera de estos elementos podría mitigarlas, pero lo cierto es que deben de ser usados varios elementos.

Fuente: Propia.

Bajo la presunción de que se presente un incendio forestal en base a la investigación levantada la medida de adaptación más propicia es la tercera, que considera el diseño de un Box Coulvert capaz de resistir episodios de precipitación moderadas y el flujo de escombros en un escenario futuro, además de tener un bajo precio y no afectar con el cierre total de la vía, generando asi que el desarrollo socioeconómico de la población no se vea afectado, asi como tampoco su calidad de vida.

Sin embargo, cabe aclarar que dentro de las opciones de adaptación el equipo de investigación también se mantiene sobre el parámetro de la ocurrencia, puesto que este es inexacto bajo los medios registrados, el plan podría estar abocado más bien en las medidas reactivas X y Y, frente a las cuales el incendio si sucedió y estamos trabajando sobre el evento.

9.4.2.2. Estudio de caso: Distrito 1 y Distrito 6, Minnesota.

Para este caso el equipo investigativo de Minnesota trabajo sobre el objetivo comprender la vulnerabilidad de las carreteras del estado a las inundaciones repentinas tras un evento climático extremo, teniendo en cuenta las proyecciones que el Cambio Climático ha arrojado que las precipitación extremas y las inundaciones asociadas a estas son cada vez más frecuentes, por lo cual selecciona de su sistema carretero tras un estudio de vulnerabilidad para desarrollar opciones de Adaptación que permitan identificar soluciones de planificación y diseños rentables que aumente la resiliencia.

Para eso centra su estudio en el distrito 1 y 6 donde se presentaron inundaciones que dejaron daños del orden de 75 millones de dólares en el sistema cuando en junio del 2012 cayeron 10 pulgadas de lluvia durante dos días. Además, dentro del histórico que el equipo de investigación encontró para el contexto del sitio que, durante el 2007, 2010 y 2012 se presentaron inundaciones notables, solo el del 2012 alcanzó las 9 pulgadas.

Un Box Coulvert (5648) en la carretera MN61 Sobre Silver Creek y ubicada en la región de Arrowhead en el distrito 1, y que tras el estudio de vulnerabilidad saco la mayor puntuación. Como contexto que nos ofrece el equipo para el estudio del caso, la alcantarilla transporta aguas de Superior Uplands a Lago Superior que es un destino turístico, por lo que esta carretera recibe un tráfico diario promedio anual de 5900 vehículos diarios y 500 camiones por día.

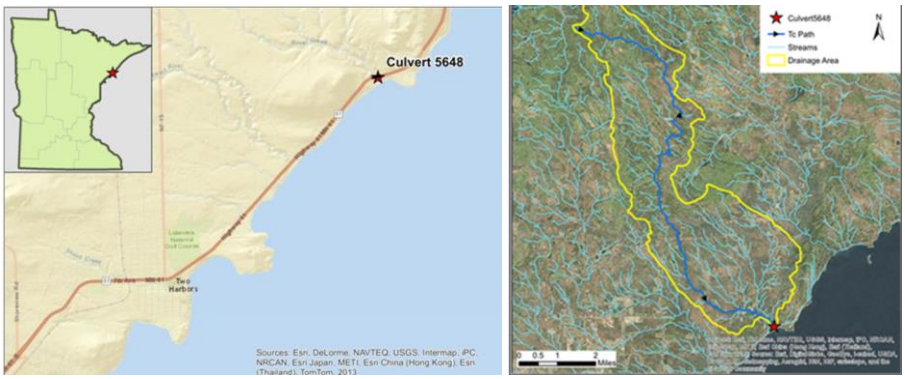


Figura 47. Ubicación del estudio Box Coulvert (5648).

Fuente: FHWA, 2015.

Es una estructura de dos celdas con 10 pies de ancho por 10 pies de alto, y la distancia longitudinalmente es de 90 pies. La Alcantarilla fue construida en 1936, por lo cual, para la época del estudio esta esta al final de su vida útil, por lo cual exhibe desconchamiento y grietas que generan la exposición de las barras de refuerzo. Además, el muro de cabecera esta agrietado, y el muro del ala sureste esta desprendido y yace al final del canal.

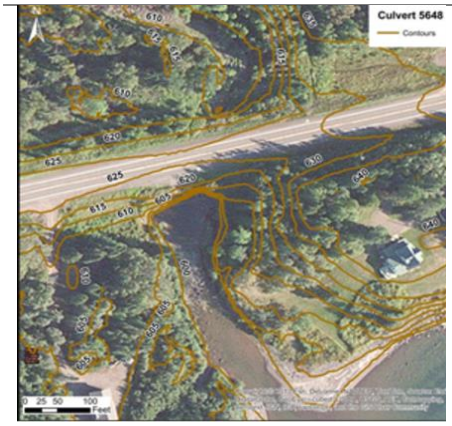


Figura 48. Vista en planta de la alcantarilla 5648 que muestra los contornos de elevación.

Fuente: FHWA, 2015.

Figura 49. Fotografía de la alcantarilla 5648, lado aguas abajo.

Fuente: FHWA, 2015

Figura 50.Fotografía de la alcantarilla 5648, lado aguas arriba.

Fuente: FHWA, 2015.

Como el equipo de investigación nos menciona en un principio, busca generar resiliencia para sus activos a los factores climaticos que se proyectan podrian intensificarse por el cambio climatico, en base a esto, el equipo usa los escenarios representativos (RCP's) 4.5, 6.0 y 8.5 de lo cuales se hayaron 22 modelos climaticos para generar las proyecciones de precipitaciones de 24 horas para cada escenario y por medio de modelación se obtuvó la información del caudal de tormenta para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500, y se relacionó a tres periodos de tiempo hasta el año 2100.

Actualmente al construir Alcantarillas o Box Coluvert se usa las estadisticas de frecuencia de precipitación desarrolladas a partir de los datos historicos que la NOAA (Nathional Oceanographic and atmospheric Administration). Por lo cual existe un sesgo entre los valores de modelos que se generan en base a los RCP's y los que la agencia tiene. Una vez se tenga los modelos climaticos, es necesario realizar un modelado hidrologico e hidraulico para comprender los caudales maximos en la cuenca y asi evaluar el rendimiento de la instalación.

En este caso, teniendo en cuenta la Alcantarilla va a ser reemplazada los datos usados para la evaluación de rendimiento es bajo los parametros de construcción teniendo en cuenta solamente los datos historicos, si esta lo satisface, entonces no sería necesario las opciones de adaptación, y solo constaría de reemplazar la estructura. Es decir que ademas de que esta trabaje con los criterios de profundidad para superar una tormenta de 50 años, si la descarga no genera socavación y el espacio libre cumple con los criterios para vias no navegables.

Como resultado de esta evaluación se determino que a pesar de que la estructura puede soportar el caudal de tormenta con Tr de 50 años, no cumple con los requisitos para paso de peces y las velocidades en la salida de la alcantarilla son mas altas que en el mismo canal produciendo erosión. Por lo cual para asegurar el paso de peces, y que se cumpla con el criterio de velocidad de salida se rediseñara la estructura teniendo en cuenta los modelos hidrologicos que se desarrollaron en base a los RCP's.

Por lo cual se presentan estas opciones de adaptación:

Tabla 10. Opciones de Adaptación, Caso de estudio Distrito 1.

Opciones de Adaptación	Ventajas	Desventajas
Opción 1: Construcción de una alcantarilla de dos celdas de 16 pies de ancho por 14 pies de altura.	Optimizada para resistir el escenario más crítico para el periodo de 2100. Control de potencial de erosión y desviación de corriente, por el aumento de la sección del canal Cumple con criterio para paso de peces. Garantiza que se mantendrá el borde libre con el caudal de tormenta (Tr: 50 años). El costo es bajo. El mantenimiento es menos intensivo.	El distrito 1 desea reemplazar las estructuras Box Coulvert en la sección de carretera por Puentes.
Opción 2: Reemplazo de la alcantarilla existente con un puente de tramo simple de 52 pies.	Optimizada para resistir el escenario medio-moderado para el periodo de 2100. Cumple para las condiciones de flujo actual, y satisface con todas las condiciones de flujo. Control de erosión y sedimentos. Cumple con el paso de peces. Garantiza que se mantendrá el borde libre con el caudal de tormenta (Tr: 50 años).	En construcción y mantenimiento es una opción costosa e intensiva. Se estimarían cierren viales por su construcción.
Opción 3: Reemplazo de la alcantarilla existente por un puente de tramo simple de 57 pies.	Optimizada para resistir el escenario más crítico para el periodo de 2100. Cumple para las condiciones de flujo actual, y satisface con todas las condiciones de flujo. Control de erosión y sedimentos. Cumple con el paso de peces.	En construcción y mantenimiento es una opción costosa e intensiva. Se estimarían cierren viales por su construcción. No cumple con el criterio de borde libre con el caudal de tormenta (Tr: 50 años).

Fuente: Propia

En cuanto al Distrito 6 se elige un **Box Coulvert (5722) en la carretera US63** en Spring Valley Creek en la ciudad de Spring Valley. La US63 es una carretera regional encargada de unir las ciudades de Rochester y Waterloo, Iowa y otras. El tráfico promedio diario anual es de 5700 vehículos diarios, y 610 camiones por día.

Figura 51. Ubicación del estudio Box Coulvert (5722).

Fuente: FHWA, 2015.

La estructura consiste en tres celdas con una longitud de 12 pies de ancho por seis pies de alto, y longitudinalmente tiene 67 pies. Cuenta con una reparación en su historial para el año 1996, sin embargo en las inspecciones visuales se pueden observar grietas verticales en diferentes partes; además se exhibe el refuerzo en aquellas partes donde hay desconchamiento.

Para la modelación climatica se usaron las mismas herramientas que se usaron con el anterior Coulvert. En cuanto al evaluación del rendimiento de la alcantarilla, se encontró que la capacidad de la misma sera superada por precipitaciones mucho mas debiles que la del caudal de tormenta de 50 años.

Por lo cual se presentan las siguientes opciones de adaptación:

Tabla 11. Opciones de Adaptación, Caso de estudio Distrito 2.

Opciones de Adaptación	Ventajas	Desventajas
Opción 1: Construcción dos celdas más de 12 pies de ancho, por 6 pies de alto.	De las tres opciones la más económica. El mantenimiento es menos intensivo. El desvío por demolición sería Aprox de 15 días.	De las tres opciones la más económica. El mantenimiento es menos intensivo. El desvío por demolición sería Aprox de 15 días.
Opción 2: Construcción dos celdas más de 12 pies de ancho, por 6 pies de alto, y la mejora de la llanura aluvial para que el rio aguas arriba se expanda.	No tiene un coste tan alto. El mantenimiento es menos intensivo. El desvío por demolición sería Aprox de 15 días.	No cumple con los criterios de desbordamiento de MnDOT para el periodo de diseño de 50 años.
Opción 3: Reemplazo de la alcantarilla existente por un puente de tres tramos de 28 pies cada uno, y la elevación de la calzada en unos 5 pies	Cumple con los criterios de diseño para resistir un caudal de tormenta (Tr:50 años), y el escenario más crítico de las modelaciones a 2100.	En construcción y mantenimiento es una opción costosa e intensiva. El desvió por demolición sería Aprox de 60 días.

Fuente: Propia

9.4.2.3. Estudio de caso: Falcon Cove, Oregón.

A razón de enfrentar el cambio climático y los eventos meteorológicos extremos que ha enfrentado el estado, este realizó estudios de vulnerabilidad a las vías del estado, tras el cual se encontró una carretera en el área de Falcon Cove que presenta un periodo de lluvia entre octubre a mayo evidencia el deslizamiento de un talud de corte al lado de una de sus carreteras. Ubicado en una pendiente de relleno en el punto de la milla 37.31 en la US 101, seis millas al norte de manzanita, en Oregón. De la información obtenida, el relleno parece haber sido construido con material nativo local, y con ángulo de inclinación ligeramente más pronunciado que 2H:1V. Una Tubería de 24 pulgadas de diámetro conduce un arroyo de este a oeste.

En épocas de lluvia el relleno experimenta deslizamientos de tierra significativo, que resulta en deformación y un movimiento diferencia de la carretera. Este tipo de comportamiento es consistente según el equipo de

estudio con las zonas de cordillera costera, caracterizado por esta reacción a las precipitaciones y la elevación de aguas subterráneas.

El equipo de mantenimiento esta zona informa que se requiere reparaciones tres veces cada dos años, o 1.5 veces anualmente, cuando eventos de lluvia fuerte comienzan a ser evidenciados en el sector, según las proyecciones realizadas a través de las modelaciones climáticas bajo eventos "Extremadamente fuertes" (2046-2065) usada para conocer la actividad del sitio, se encontró que la carretera necesitara reparaciones 2.5 veces al año, o 5 veces cada dos años.

A continuación, se presentan las opciones de adaptación:

Tabla 12. Opciones de Adaptación, Caso de estudio Falcon Cove.

Opciones de Adaptación	Ventajas	Desventajas
Opción 1: No hacer nada.	Se dependerá de los trabajos de mantenimiento para restaurarla y mantenerla en condiciones de servicio.	Sin intervención la carretera deberá ser reconstruida en 30 años debido a que fallará. Además, el costo de mantenimiento y reparación tras eventos de lluvias fuertes es bastante alto.
Opción 2: Relleno ligero.	Reemplazar el material (suelo) con relleno ligero disminuiría la fuerza motriz del deslizamiento. Reduce la frecuencia de mantenimiento a una vez cada 5 años con el nivel actual de esfuerzo y tiempo de cierre.	Debe de reconstruirse cada 10 años debido al asentamiento interno y el desgaste.
Opción 3: Grada inferior.	Eliminar la parte superior del relleno y reducir la pendiente sobre la tubería, esta opción además controla la cantidad de material que se desliza y la cantidad de material de reparación. La frecuencia de mantenimiento sería una cada tres años.	-
Opción 4: Contrafuerte y cuña de corte.	El material (Terraplén de piedra) del contrafuerte disminuye la cantidad de agua sobre la masa del deslizamiento. El material proporciona las propiedades de drenaje y resistencia al corte para estabilizar. Requiere un mantenimiento cada 15 años.	Requiere una superposición de pavimento menor debido al asentamiento de la base a largo plazo. También, las cantidades exactas de excavación/terraplén tendrían que determinarse mediante una investigación geotécnica antes de la construcción.
Opción 5: Reconstruir el relleno para todo clima y redimensionar la lluvia**.**	Se reemplaza el material por terraplén de piedra para resistir la deformación y con suficiente permeabilidad. Requiere uno o dos mantenimientos según el estado de la capa de rodadura durante su vida útil.	Requiere rediseñar la alcantarilla para aumentar la capacidad, y reconstruir el terraplén.

Fuente: Propia

9.4.2.4. Estudio de caso: Pantano de Gallaher, Oregón.

Para este estudio de caso, el equipo de investigación revisó un tramo de la carretera US101 ubicado entre los puentes del rio Nehalem, un puente alto de varios tramos a través del cual se movilizaba la mayor parte

del tráfico fluvial; y el puente Gallaher Slough, un puente bajo de un solo tramo con compuerta de marea. La elevación de la carretera es de 8.5 pies sobre el nivel del mar, con pendientes entre 3H:1V a 4H:1V y además cuenta con una protección para el oleaje a base de diques en el punto del puente Gallaher Slough.

Las características como la elevación, construcción y ubicación hacen susceptible a las instalaciones a inundaciones, socavación, erosión y fallas de terraplén, por lo que en consideración a las proyecciones compartidas por los expertos en meteorología en las cuales los eventos meteorológicos tienden a aumentar en frecuencia e intensidad, el DOT desea generar opciones de adaptación para estos activos. Además, durante los episodios de lluvias más intensos se producen inundaciones que bordean el pavimento, y fallas por la reducción del borde libre en puentes por la subida de aguas.

Si bien, hasta el momento estas condiciones no han generado condiciones críticas para los activos, existe la posibilidad de que la combinación de factores como las precipitaciones y el Aumento del nivel del mar, junto a una agudización de precipitaciones y temperaturas genere cierres viales, incomunicando las comunidades que conecta y desarrollando patologías tempranas en el activo como deterioro del concreto o socavación que lleven a la falla del activo.

Tabla 13. Opciones de Adaptación, Caso de estudio Pantano de Gallagher

Opciones de Adaptación	Ventajas	Desventajas
Opción 1: Ninguna acción.	Se dependerá de los trabajos de mantenimiento para restaurarla y mantenerla en condiciones de servicio.	El costo de mantenimiento y reparación tras eventos de lluvias fuertes es bastante alto. Se darían cierres viales mientras se controla la inundación. Existiría acumulación de sedimentos durante cada evento, lo cual implicaría cierres parciales y costos de mantenimiento.
Opción 2: Construir barreras y reforzar canales.	Se protegera los bordes de la calzada y los puentes más cerca de la ciénega de la erosión con recubrimientos de piedra. Además, la opción se fortalecería con un muro barrera en la desembocadura del arroyo para evitar que eventos de marea alta lleven sedimentos al canal.	El uso de Barreras como opción de mitigación implica que es necesario monitoreo y mantenimiento constante para limpiar las barreras de sedimentos, al mismo tiempo que revisar el estado de los Box Coulvert de la carretera.
Opción 3: Construir barreras contras escombros, mejorar canales y reemplazar estructuras.	Igual que la opción 2, con la reconstrucción y reemplazo de alcantarillas existentes por puentes o estructuras de mayor capacidad, y la elevación de carretera en los lugares donde el flujo se afectado por un efecto de lluvia intensa.	Con el aumento de agua y el aumento de sección, podría existir un aumento de velocidades que desarrolle erosiones en los puentes.

Fuente: Propia

9.4.2.5. Estudio de caso: Cuencas del Rio Skunk y el rio Cedar, Iowa.

El estudio de caso está dirigido a encontrar opciones de adaptación para puentes dentro de estas dos cuencas debido a las inundaciones regulares que sufre la carretera por las precipitaciones y el aumento de caudales en la zona. Frente a esto el equipo de investigación evaluó la vulnerabilidad de los activos en la

región, y asi mismo genera una simulación climática que tenga en cuenta las precipitaciones bajo un contexto de cambio climático, y el análisis de los caudales fluviales, esto bajo las consideraciones de que los gases de efecto invernadero aumentaran los caudales en un futuro, y que las precipitaciones aumentaran.

Iowa ha tenido desde el 2000 varios puentes que han experimentado caudales récord e inundaciones que han afectado la red de carreteras, y sus recuperaciones ha alcanzado el orden de los 4000 millones de dólares, en el 2008 el rio Cedar tuvo una inundación que supero el 1,4 veces la probabilidad de excedencia anual, rio abajo la carretera I-80 tuvo que ser cerrada por 4 días y requirió un desvió de 180 millas; en el 2010, el rio South Skunk alcanzó el 0,2% de la probabilidad de excedencia anual lo que resultó en el cierre de la I-35 y la US-30 durante varios días.

De acuerdo a las evaluaciones de vulnerabilidad que realizó el equipo las estructuras de dos puentes en la I-80, y el puente entre I-35 y US-30, desde el 2013 podrían verse afectados por caudales que causen desbordamiento en la carretera de manera más frecuentemente:

Tabla 14. Opciones de Adaptación, Caso de estudio Cuencas del Rio Skunk y el rio Cedar,

Opciones de Adaptación	Ventajas	Desventajas
Opción 1: Elevación de la interestatal en 2 pies, un puente ligeramente más grande, y estructuras complementarias como canal de desbordamiento y una alcantarilla de 4 cajones.	levación de la interestatal en 2 pies, un uente ligeramente más grande, y estructuras omplementarias como canal de esbordamiento y una alcantarilla de 4 ajones.	Elevar los puentes puede implicar tratar con una mayor sedimentación de las estructuras por un mayor flujo de agua, por lo que debe tenerse en cuenta para no perder la estructura por socavación.
Opción 2: Elevación de la interestatal junto a la construcción de un puente más grande.	Elevación de la interestatal junto a la construcción de un puente más grande.	Elevar los puentes puede implicar tratar con una mayor sedimentación de las estructuras por un mayor flujo de agua, por lo que debe tenerse en cuenta para no perder la estructura por socavación. No hay plan para actualización de estructuras por lo que implicaría cambiar un solo puente.

Fuente: Propia

9.4.3. Retos y recomendaciones:

A continuación, mostramos la síntesis del capítulo, presentando las opciones de adaptación frente a la incidencia presentada. En este caso, la mayoría de casos fueron atendidos con opciones de adaptación donde se trabajan soluciones estructurales como rediseño, y cambio por otra estructura que desarrolle la misma función, algunas también se combinan con opciones de adaptación como mejoramiento de llanura aluvial, o terreno circundante, o simplemente se compone de depender de manteamientos hasta el final de la vida útil del activo, implicando que mejorar la condiciones existentes también puede ayudar a la mitigación del riesgo y la adaptación del activo al impacto.

Tabla 15. Soluciones para casos de estudio.

Caso	Impacto	Opciones de adaptación	Tipo de solución

Canyon Cove Lane	**Incendio Forestal e inundaciones**	Construcción de puente con elevación de 4 pies, y 50 pies de Longitud	Cambio de Estructura
		Reemplazo de la alcantarilla por una doble de 8x8 cada cajón	Rediseño de Estructura
		Reemplazo de la alcantarilla por una de triple cajón de 8x8 cada cajón	Rediseño de Estructura
Distrito 1	**Inundaciones**	construcción de una alcantarilla de dos celdas de 16 pies de ancho por 14 pies de altura.	Rediseño de Estructura
		construcción de una alcantarilla de dos celdas de 16 pies de ancho por 14 pies de altura.	Rediseño de Estructura
		Reemplazo de la alcantarilla existente por un puente de tramo simple de 57 pies.	Cambio de Estructura
Distrito 6	**Inundaciones**	construcción dos celdas más de 12 pies de ancho, por 6 pies de alto.	Rediseño de Estructura
		construcción dos celdas más de 12 pies de ancho, por 6 pies de alto, y la mejora de la llanura aluvial para que el rio aguas arriba se expanda.	Rediseño de Estructura + Adaptación ambiental
		reemplazo de la alcantarilla existente por un puente de tres tramos de 28 pies cada uno, y la elevación de la calzada en unos 5 pies	Cambio de Estructura
Falcon Cove	**Deslizamientos**	No hacer nada.	Mantenimientos
		Relleno ligero.	Rediseño de Estructura
		Grada inferior.	Rediseño de Estructura
		Contrafuerte y cuña de corte.	Diseño de estructura de contención
		Reconstruir el relleno para todo clima y redimensionar la lluvia.	Cambio de Estructura
Pantano de Gallaher	**Inundaciones y Aumento del Nivel del mar**	Ninguna acción.	Mantenimientos
		Construir barreras y reforzar canales.	Diseño de estructura de contención
		Construir barreras contras escombros, mejorar canales y reemplazar estructuras	Cambio de Estructura + Diseño de estructura de contención

Rio Skunk	**Inundaciones**	Elevación de la interestatal en 2 pies, un puente ligeramente más grande, y estructuras complementarias como canal de desbordamiento y una alcantarilla de 4 cajones.	Rediseño de Estructura + Diseño de estructuras de drenaje
Rio Cedar	**Inundaciones**	Elevación de la interestatal junto a la construcción de un puente más grande	Rediseño de Estructura

Fuente: Propia

Para la investigación de pilotos internacionales, el criterio para escogerlos fue la dinámica o tipo de evento amenazante que enfrentara la región o zona donde se desarrollaba, con el fin de entender la apropiación y respuesta frente a la incidencia. Canyon Cove Lane tiene una lección importante sobre la dinámica conjunta que ofrecen dos eventos relacionados a un fenómeno natural distinto, capaz de generar situaciones desfavorables para la infraestructura.

De acuerdo con la investigación Colombia, presenta un escenario climático que aumenta la posibilidad de que este tipo de escenarios se desarrolle, en sus meses más secos, y bajo la consideración de un aumento de temperatura. Una muestra de esto podría ser que la región Andina es la que hasta ahora a presentando mayor número Amenazas por Incendios Forestales, y a su vez a Amenazas por Inundaciones según el UNGRD. Por lo cual no sería incorrecto plantear que la existencia de los dos eventos en distintos periodos de tiempo puedan generar una escenario de riesgo mayor como el mencionado en el caso de estudio uno, considerando que según el IDEAM y el IPCC se proyectan aumentos de temperatura a nivel mundial, y que los incendios forestales si bien catalogados de riesgo medio – bajo, no han sido estudiados con detalle, y tampoco se tienen muchas herramientas de prevención, por lo que generalmente la acción siempre es reactiva dejando menos margen para su mitigación.

Por otro lado, las inundaciones son algo que el país enfrenta de manera constante y se destaca aquí la participación de organismos como el IDEAM y UNGRD que en base a la problemática monitorean constantemente el estado del país y han desarrollado herramientas como un mapa de zonas inundables, que caracteriza el riesgo en regiones con mayores incidencias, lo que permite el desarrollo de herramientas, técnicas, tecnologías e investigación para la adaptación de carreteras. Como la importancia de la inclusión de los escenarios de TCNCC en el desarrollo y diseño de nuevas estructuras, como se mencionaba al principio, la construcción de nueva infraestructura basada solamente en proyecciones históricas es insuficiente frente a las nuevas amenazas. Esto implica igualmente, que en un futuro muchas estructuras que incluso no han superado su vida útil serán insuficientes como se evidencio en el segundo caso estudio.

No obstante, aunque la región Andina es bastante representativa frente a inundaciones, Colombia pose una parte costera extensa, y aunque solo el 9% de la infraestructura carretera se ubica en esta zona, esta también presenta un grado de amenaza moderado, que puede verse influenciado nuevamente por la convergencia de dos dinámicas en este caso, el aumento del nivel del mar y el aumento de precipitaciones. La Guajira y Cartagena son territorios costeros afectados por inundaciones especialmente vulnerables por su relación con el mar; sobre mitigación e investigación CLIMARES, INVEMAR, CDKN y el CEPAL han invertido en estudios de vulnerabilidad y medidas de mitigación frente a este tipo de eventos aunque su relación con vías es parte de la investigación, por el alcance del ejercicio no centran sus esfuerzos de manera directa, sin embargo, medidas blandas como el encaminamiento de políticas y planes de mitigación a planes de ordenamiento territorial, planes de manejo de cuencas y planes de emergencias también son herramientas valiosas. En esto el caso de estudio 4 y 5, son representativos por el uso de

estrategias blandas como la mejora de la cuenca, estrategia usada para mejorar el flujo de la corriente y en algunos casos, también reducir la sedimentación. INVEMAR (2011) indica que las herramientas de adaptación deben cumplir con advertir y trabajar sobre las proyecciones climáticas futuras, identificar y utilizar herramientas que permitan toman de decisiones con la aprobación de los interesados, establecer un sistema de evaluación de vulnerabilidad.

Cabe aclarar que escoger el caso estudio 3, quería resaltar la visibilidad de los eventos de deslizamiento, y las opciones de adaptación sobre los mismos. Sin embargo, una parte importante también que se usó como criterio era la incorporación de opciones reactivas, es decir actuar tras la ocurrencia del evento, que, aunque es una de las cosas que se quiere evitar propone la existencia o no de herramientas para alterar la zona y mitigar el riesgo, o si en el momento la opción factible es simplemente dar respuesta al incidente y hacer que el tramo esté disponible lo más pronto posible.

Los casos del Distrito 1 y 9 son un punto de consideración sobre la importancia del seguimiento de vida útil y la inclusión de activos en los planes de actualización de vías, y se ajusta al criterio de si por el momento las opción reactiva es un forma de enfrentar la incidencia; si bien una de las estructuras estaba finalizando su vida útil, y esto permitía que los esfuerzos de reconstrucción se tomaran como parte del plan de actualización de activos para la ruta carretera, generando menos traumatismo a las comunidades y las dinámicas socio-económicas, además de cubrir los intereses de la misma. El otro caso, trae una situación distinta, ya que no había superado su vida útil y el DOT (Departamento de transporte) de esta ruta no tenía planes de actualización, generando que este fuera un evento para satisfacer la necesidad de reparación y mitigación de eventos amenazantes para ese tramo, además del ajuste de la vía para el acople del activo y la mejora del sector, claramente a la larga traerá connotaciones propias como su integración a la carretera. Sin embargo, aquí es importante entender si la acción preventiva y la actualización del tramo sería mejor, o si las acciones reactivas al atender la emergencia cuando se presente y enfrentar cierres viales generaría más beneficios a los interesados hasta que sea el momento de incluirse un plan de actualización.

Aunque, como país, presentamos un avance sobre el tema de adaptación al cambio climático frente a otros países del centro y sur de America políticas e investigación, sobre infraestructura vial todavía se presenta un rezago importante, sobre el uso de tecnologías de información y la actualización de información sobre el estado de infraestructura existente, además de la disponibilidad y centralización de información. Si bien, en el plan vías CC, realizado en el 2015 - 2018 por el gobierno de Colombia con consultoría externa, evidencia una parte del estado de la red vial primaria, y el nivel de amenaza al que se encuentra expuesto, actualmente no tiene una actualización, y que su estudio haya sido realizado sobre la red primaria vial crea incertidumbre sobre el estado total de carreteras en el país. Aunque frente a este rezago Colombia aprende, y de mano del INVIAS ha realizado foros nacionales e internacionales que le permitan aprender experiencias internacionales de la gestión e inventario de activos viales dentro de la red nacional (Primaria, secundaria y terciaria) y esto presenta una oportunidad para aquellos sectores donde las carreteras se encuentran deterioradas y sus activos no tienen las especificaciones para soportar el cambio climático, generando beneficios económicos y sociales a comunidades desconectadas de la red primaria.

La pertinencia de contar con esta gestión de activos actualizada también consiste en el panorama general de afectaciones, solo la anterior ola invernal 2021 -2023 (DNP, 2024) dejo la afectación de 48 puentes en 17 departamentos. Sin embargo, a un año de la emergencia y de acuerdo con el diario El País (4 de abril, 2024) existen 40 puentes en alto riesgo por daño extremo y falla total, 4 en extremo de falla total y 36 con daño grave, entre activos del INVIAS y la ANI. Aunque esta información corresponde a los datos generales recopilados a base de una investigación llevada a cabo por la contraloría y no dan muestras de pertenecer a impactos por fenómenos

climatológicos, dan una evidencia de la vulnerabilidad de los activos a nivel Nacional considerando la ocurrencia y exposición a fenómenos de variabilidad climática de la zona.

El Marco de trabajo de Vulnerabilidad y Adaptación, de la FHWA (2018), propone que si bien las opciones de adaptación dependerán de cada región, o sitio, los ejercicios de revisión sobre impactos parecidos pueden establecer caminos comunes para obtener esas opciones desde que se establezca una correcta evaluación de vulnerabilidad desde el conocimiento de factores climáticos y capacidad de la infraestructura, y las opciones pueden ir desde la construcción, readaptación, reubicación o mantenimientos intensivos, hasta opciones más blandas como políticas y manejos.

10. CONCLUSIONES:

Para el cierre o conclusión de esta revisión documental se plantean las conclusiones por cumplimiento de objetivos especifico con el objetivo de denotar dentro de la investigación las dificultades que se tuvieron en la investigación, las oportunidades, las recomendaciones y las experiencias frente a la obtención del objetivo.

- Objetivo 1: Identificar los factores climáticos existentes que afectan la infraestructura vial y los impactos sobre la misma.

Frente a este objetivo, el cierre se obtiene en la síntesis de la tabla 6, Matriz 1, donde se muestran la posibilidad de ocurrencia de los eventos y sub-eventos amenazantes asociados al Cambio Climático y la variabilidad climática, si bien, Colombia tiene información climática disponible sobre su territorio, en muchas ocasiones se encontró demasiado especifica la información, es decir que directamente la información que se encuentra esta casi a una escala municipal y/o departamental, lo que debido a al alcance de este trabajo, fue tratada en una escala regional, resultaba ser una muestra demasiado pequeña para tomarla como información representativa del lugar. Sin embargo, organismos con la UNGRD resultaron bastante útiles para construir el panorama ya que dentro de sus bases de datos construían escenarios regionales del clima en cuanto a Temperatura y Precipitaciones, que fue clave para determinar cómo se comportaba el clima a un rango lo más cercano a la actualidad, aunque esta información tiene un rango de 2021 -2023.

Como oportunidad, puede considerarse la realización de estudios más enfocados a fenómenos climáticos por región, como manera de consolidar un análisis de cuál puede ser el porcentaje de riegos, dentro del trabajo se trabajaron con los eventos atendidos que se tenían en las bases de datos de UNGRD hasta el 2023, lo cual brindo una fuente importante de información sobre el panorama de cambio climático, variabilidad climática y emergencias registradas en el País.

Otro reto para el estudio es la necesidad de actualizar la información climática para dar un diagnóstico más preciso, y es que la información esta analizada desde la perspectiva de la Unidad Nacional de Gestión de riesgo, lo que hace que el número de eventos relacionados no sea especifico para el sector de infraestructura carretera, y el informe de emergencias viales atendido solo toma un periodo de enero a octubre del 2023. En este caso, para el lineamiento nos ayudo a generar un esbozo general sobre la afectación vial debida a fenómenos naturales, pero contar con la una información más centralizada permitiría a la investigación entender la amenaza y dar tratamiento a la vulnerabilidad existente en activos.

El cierre del capítulo 1, dejo una síntesis importante además de la matriz y es que la exposición al clima genera una gran vulnerabilidad, incluso a impactos que no se tenían tan presentes como los aumentos de temperatura y el nivel del mar, variables en la cuales se encuentra información relevante y esfuerzos por parte de varios organismos para detener su avance, mitigar y generar resiliencia a todos los niveles de infraestructura. El ultimo fenómeno de El Niño propicio el potencial de ocurrencia de incendios forestales, y en tan solo 25 días se presentaron 500 eventos, que acabaron con varias hectáreas de cobertura vegetal (El Portafolio, 2024), y temperaturas que alcanzaron 40°C en varias ciudades del país, generando desgaste a carreteras y deterioro en las llantas de vehículos que usaron las carreteras. Por lo que si bien, el efecto no parece tan devastador como los impactos del aumento de precipitaciones, sigue generando daños a la infraestructura y los usuarios.

Como evento relevante, aquellos que se propician por acción de las precipitaciones suele tener los impactos más altos, y aunque a nivel general el país tendrá un aumento de temperatura en los próximos años, los eventos como inundaciones o crecientes súbitas, deslizamientos y avenidas presentan mayores afectaciones a la infraestructura carretera. Teniendo en cuenta que las proyecciones de Tercera comunicación informan de un aumento de precipitaciones, estas pueden llegar a generar un mayor impacto teniendo en cuenta que este aumento está proyectado para regiones de alta pendiente, o con una topografía de pendientes pronunciadas con una actividad regular en deslizamientos e inundaciones.

- Objetivo 2: Identificar infraestructura vial propia del país y caracterizarla reconociendo los impactos que pueden sufrir debido a fenómenos derivados del cambio climático, seleccionando los más crítico o relevantes.

De acuerdo con lo expuesto en los marcos la razón de aprender sobre la infraestructura también era entender la mecánica entre estos elementos expuestos y el clima, si bien dentro de la concepción estos elementos contemplan el clima para su diseño, la dinámica climática varía según eventos antropológicos y naturales (como la radiación) por lo que las proyecciones desde la información histórica suele quedarse corta a la hora de exponer un impacto, en el caso de Colombia, la modelación actual se rige bajo 4 escenarios (RCP'S) que contemplan un nivel de emisiones de GEI que podrían afectar el devenir del comportamiento climático, y esto sería lo que debería ser capaz de resistir los activos de la red carretera. En base a esta concepción, se planteó la revisión de los elementos más comunes o típicos de nuestras redes carreteras colombianas, su funcionalidad, en lo posible de que material la normal lo contemplaba y a su vez las partes que lo compusieran para entender a profundidad el sistema.

Este objetivo se logró en base a la compilación de impactos realizada en la tabla 7, matriz 2, donde se expuso dicha infraestructura típica contra los impactos recopilados en el primer capítulo, y se revisó la literatura la información sobre los daños que producían. El reconocimiento de estos impactos y sus efectos en la infraestructura ofrecen un panorama de las patologías, daños y acciones para evaluar las opciones de mitigación desde dichas problemáticas. Si bien, la información disponible en el país sobre daños e impactos esta reducida, países como Estados Unidos ofrecieron una guía sobre cómo llevar a cabo la creación de la matriz y la vez otorgo información relevante sobre los impactos, de los cuales se tomaron los más acordes a nuestras condiciones climáticas. Igualmente, ofrecieron información importante otros documentos internacionales.

Estructuras como Box Culverts, puentes y calzadas suelen tener mayor impacto frente a un fenómeno por factor climático, sin embargo, esta es una percepción de lo que nos muestra la literatura analizada, de acuerdo con lo fácil y abierta que fue la búsqueda. Es decir, hay una mayor investigación y evaluación vulnerabilidad, mitigación y resiliencia de estas estructuras en comparación a otras. A nivel nacional el nivel de especificidad frente a daños por estructura no fue encontrado, pero si los eventos que atiende el INVIAS, y dentro de esta investigación se encontró que posee un inventario de puentes mayores a 10 metros, y una aplicación sobre desastres en vías a su cargo, lo cual generan fuentes de información valiosas para análisis posteriores.

- Objetivo 3: Identificar buenas prácticas tanto a nivel internacional como nacional, permitiendo realizar un análisis de sus oportunidades y resultados obtenidos que garanticen una infraestructura resiliente, y que puedan adaptarse al contexto colombiano.

De cara al tercer objetivo, se buscó que las opciones presentadas reflejaran panoramas acordes a la realidad del país, con el fin de que pudieran orientar los resultados de investigación en otros campos. Asimismo, se procuró que las estructuras fueran diversas y contemplaran activos que suelen ser los más afectados durante eventos como inundaciones, deslizamientos, aumento del nivel del mar e incendios forestales. Las opciones fueron tomadas de pilotos de adaptación implementados por diferentes departamentos de transporte del EE.UU. Estas opciones son adaptables al contexto, ya que incluyen las acciones realizadas en cada caso. Sin embargo, es importante entender que las opciones de adaptación dependerán del sitio, el activo y la situación climática, así como del alcance de las herramientas utilizadas en la etapa de evaluación.

Según la FHWA (2018), las opciones de adaptación pueden clasificarse en naturales, estructurales o basadas en políticas. Además, pueden tener un enfoque preventivo, como aquellas en las que el activo sigue siendo útil, aunque esté deteriorado, pero se buscan medidas para garantizar su resistencia. También pueden ser reactivas, en situaciones en las que el peor evento posible ya ocurrió, y se busca construir un nuevo activo. Un ejemplo de enfoque reactivo es el caso de estudio 1, donde la alcantarilla ha superado sus condiciones tras cada inundación. En este caso, se busca mitigar el flujo de sedimentos para evitar que la carga adicional cause el colapso del sistema de drenaje de la alcantarilla.

En la revisión también se encontró que Colombia cuenta con pilotos de adaptación para ciudades costeras y planes de adaptación que generan lineamientos para evaluar las opciones de adaptación. Esto es de suma importancia, ya que la investigación demuestra que ciudades como Cartagena presentan una alta vulnerabilidad a eventos de inundación cuando se combinan fenómenos de precipitación y el aumento del nivel del mar. También, comienza a actuar con pilotos de resiliencia de enfoque blando como la revisión de humedales, y reestructuración de cauces y cuencas para adaptarse al cambio climático; o sistema de detección temprana de fenómenos de origen natural por eventos climatológicos.

En la búsqueda documental no se hallaron pilotos, sin embargo, se encontró que el gobierno colombiano de la mano con otros sectores si han desarrollado obras de infraestructura diseñadas para adaptarse a la situación climática del país, actual y futura. Lo que representa un avance teniendo en cuenta los desastres ocurridos tras Fenómenos de La Niña y el Niño. Además, que busca constantemente asesoría por otros países en la búsqueda

del desarrollo de integración de Adaptación al Cambio Climático a políticas, normativas, técnicas y tecnologías en varios sectores, y su integración a la Gestión de Riesgos de Desastres. Como se mencionó en el capítulo 4, lograr la experticia y la obtención de información actualizada y abierta, es importante para el sector vial, el gobierno y la investigación.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

- Bibliografía

1. Asociación mundial de la Carretera - PIARC. (2015). Marco Internacional para la Adaptación de la infraestructura de carreteras al cambio Climático. (ISBN) 978-2-84060-373-3. Disponible en: https://www.piarc.org/ressources/publications/9/25863,2015R03ES.pdf
2. Asociación mundial del Carreteras - PIARC (2022) Medidas para aumentar la Adaptabilidad de los puentes de Carretera al Cambio climático. Francia. Número de libro estándar internacional: 978-2-84060-711.3
3. Aristizábal, E., Arango Carmona, M. I. y García López, I. K. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, *29*(1), 242–258. https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.72612
4. Banco Mundial. (2023). Colombia: Informe sobre clima y desarrollo el país. Washington D.C. Grupo Banco Mundial. https://documents1.worldbank.org/curated/en/099072023124015474/pdf/P1781040f920a400809a2c09e70149f435b.pdf?_gl=1*txi3i9*_gcl_aw*R0NMLjE3MjMwNTExMTAuQ2owS0NRand0c3kxQmhEN0FSSXNBSE9pNHhhODVoZGhKdlJMUmtvVnhoTEs0ZHRhSWdvankwVFR1WE5ZY2Vjd2FIMVk1a3ZEdENKYTAxUWFBal9VRUFMd193Y0I.*_gcl_au*NDk5ODQzMjM4LjE3MjIxNzUyOTc.
5. Banco Interamericano de Desarrollo. (2022) Informe de sostenibilidad 2022. Banco Interamericano de Desarrollo. https://publications.iadb.org/en/publications/spanish/viewer/Banco-Interamericano-de-Desarrollo-informe-de-sostenibilidad-2022.pdf
6. Banco de desarrollo de America Latina. (2018) Guía de Buenas Prácticas para la Adaptación de las carreteras al Clima. Corporación Andina de Fomento, La versión digital de este libro se encuentra en: https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1221/Gu%c3%ada%20BP%20adaptaci%c3%b3n%20carreteras_CAF.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
7. Cabrera, A., Gutiérrez, Y., (2024) Los Derechos De La Naturaleza Para El Fortalecimiento De La Resiliencia Y La Reducción Del Riesgo DE Desastres En El Marco De Sendai 2015-2030. Universidad Católica de Manizales, Manizales.
8. Cardona, O.D., Bernal, G., Pabón, J.D., M. A., Marulanda, M. C., Carreño, M. L., González, D., Villegas, C., Marulanda, P., Grajales, S., Rincón, D., Molina, J.F. (2020). Entregable 3: Informe con los resultados de la propuesta de medidas de adaptación y su efecto en reducción del riesgo – Fase 1. Preparado para Expertise France. INGENIAR Risk Intelligence Ltda. Bogotá.
9. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2015). Estudios del cambio climático en américa latina, Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile. LC/W.675. Puede revisarse en: https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/889969d0-e5a0-48cf-a01d-54432324a595/content
10. Corporación Autónoma regional de Santander. (2024). Plan de Contingencias fenómeno del Niño 2023-2024. San Gil, Santander. Colombia. Puede revisarse en: https://cas.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/Plan-de-Contingencia-Fenomeno-del-Nino-2023-2024.pdf
11. Consejo privado de Competitividad (2020) Informe Nacional De Competitividad 2020-2021. Disponible en: https://compite.com.co/wp-content/uploads/2024/03/d65429b3-4819-48f4-8197-0ff127e7812f.pdf

12. De la Peña, E., Díaz, J., Rodrigo, M., Miralles, E., Díaz, L., Valdés, S., & Canalda, L. (2018). Guía de Buenas Prácticas para la Adaptación de las Carreteras al Clima. Caracas: CAF. Disponible en: https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1221Departamento Nacional de Planeación. (2012) Plan Nacional de adaptación al cambio climático. (1° Ed) disponible en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/1._Plan_Nacional_de_Adaptacion_al_Cambio_Climatico.pdf
13. Desarrollo Internacional del Reino Unido, Dirección general de Cooperación internacional de los Países Bajos. (2014). DOCUMENTO DE VISIÓN Cambio Climático y Sector Vial en Colombia, https://cdkn.org/sites/default/files/files/Documento-Visi%C3%B3n-Sector-Vial-y-CC.pdf}
14. DNP-BID (2014). Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia – Síntesis. Bogotá, Colombia
15. DNP (2018). Índice Municipal de Riesgo de Desastres Ajustado por Capacidades. Bogotá D.C., Colombia.
16. Federal Highway Administration - FHWA. (2018). Vulnerability Assessment and Adaptation Framework. (3° Ed). Disponible en: https://www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/resilience/adaptation_framework/
17. Fundación para la Educación Superior y el Desarrollo – FEDESARROLLO, Fondo Adaptación, CAF - Banco de Desarrollo de América Latina (2019) Proyectos de infraestructura resiliente a impactos del cambio climático. Fondo Adaptación: una lección para compartir en los sectores de vivienda y transporte. Primera edición. Colombia. ISBN: 978-958-52187-4-1. Disponible en: https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1475/Proyectos%20de%20infraestructura%20resiliente%20al%20cambio%20clim%C3%A1tico%20%28resumen%20ejecutivo%29.pdf
18. Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. (2021). Cambio climático 2021: Bases físicas. Suiza. IPCC. ISBN 978-92-9169-358-0; Disponible en https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf
19. Gobierno de Colombia. (2023) Colombia: Evaluación de daños, perdidas e impactos asociados a la ocurrencia del fenómeno de la Niña 2021 – 2023. Colombia. Disponible en: https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Manejo/EVALUACION-DANOS-PERDIDAS-IMPACTOS-FENOMENO-LA-NINA.pdf
20. Gobierno de Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017) Política Nacional de Adaptación al cambio Climático. (Eds.) ISBN: 978-958-8901-65-7
21. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2021). Cambio climático 2021 Bases físicas. Suiza. Impreso en octubre de 2021 por el IPCC, Suiza. ISBN 978-92-9169-358-0.
22. Higuera C., Pacheco O., (2010) PATOLOGÍA DE PAVIMENTOS ARTICULADOS. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 9, No. 17, pp. 75-94 - ISSN 1692-3324
23. IDEAM. (2024, 1 de julio). Boletín de condiciones hidrometeorológicas actuales No. 0549. https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/condiciones_hidrometeorologicas_actuales_ndeg_0549_01_de_julio_de_2024_1800.pdf
24. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCILLERÍA. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional - Regional: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. ISBN 978-958-8902-57-9.
25. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCILLERÍA. 2015. Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. ISBN 978-958-8902-55-5
26. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CAN - CILLERÍA. (2017). Resumen ejecutivo Tercera Comunicación Nacional De Colombia a La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC). Ter - cera

Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCILLERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia. ISBN: 978-958-8971-59-9.
27. IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCILLERÍA. (2021). Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCILLERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia. ISSN: 2805-8232.
28. IDEAM – UNAL. (2018). Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia, Bogotá, D.C., Publicación aprobada por el IDEAM marzo de 2018, ISBN: 978-958-8067-97-1.
29. Invemar, MADS, Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias y CDKN. 2014. Integración de la adaptación al cambio climático en la planificación territorial y gestión sectorial de Cartagena de Indias. Informe técnico final. Editores: Rojas G., X., M. Ulloque R. y M. Lacoste. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 62, Santa Marta. ISBN: 978-958-8448-59-6.
30. Instituto Mexicano de transporte (2019) Marco Metodológico para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático en México. ISSN 0188-7297.
31. Instituto Nacional de Vías. (2022). Actualización Plan de Gestión del Riesgo de Desastres Decreto 2157 de 2017. Bogotá, Colombia. Disponible en: https://www.invias.gov.co/index.php/normativa/politicas-y-lineamientos/cnsc/sostenibilidad/13829-actualizacion-al-plan-de-gestion-del-riesgo-de-desastres-agosto-de-2022/file
32. Lizano O., Ortiz J. y Plazas J. (2011) Evaluación de la actividad ciclónica y el impacto del oleaje en la Isla de San Andrés desde 1851 hasta 2010. San Andrés, Colombia. DOI:10.26640/22159045.226
33. Mejía, F. (2010) Estructuras de vertimiento de aguas en laderas de media a fuerte pendiente: Canal de pantallas deflectoras (CPD) y canal de rápidas con tapa y columpio (CRTC). Universidad Nacional de Colombia, Manizales. ISBN: 9789588280288
34. Ministerio de Transporte, INVIAS, ANI, CDKN. (2014). Plan Vías-CC: Vías compatibles con el clima. Plan de adaptación de la red vial primaria de Colombia. Bogotá, Colombia. Disponible en: https://www.ani.gov.co/sites/default/files/u789/plan_vias-cc_vias_compatibles_con_el_clima.pdf
35. Ministerio de transporte, INVIAS (2009) Manual de drenaje para Carreteras. Gobierno de Colombia. Colombia. Disponible en: https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras/file
36. Ministerio de transporte, INVIAS (2015) Guía de diseño de pavimentos con Placa -Huella. Gobierno de Colombia. Bogotá D.C. Disponible en: https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/6644-guia-de-disenoo-de-pavimentos-con-placa-huella/file
37. Ministerio de transporte, INVIAS (2017) Cartilla guía para la evaluación de cantidades y ejecución de presupuestos para la construcción de obras de la red terciaria y férrea. Gobierno de Colombia. Bogotá D.C. Disponible en: https://onl.dnp.gov.co/sites/comunidadvirtual/Tecnologas%20%20intervenciones/Cartilla%20gu%C3%ADa%20para%20evaluaci%C3%B3n%20de%20cantidades%20y%20ejecucion%20de%20presupuestos.pdf
38. Repaso de Fluidos (2013) Lerma, D. Clase 1, Mecánica de Fluidos. Universidad Libre. https://es.slideshare.net/slideshow/clase-1-repaso-fluidos/18924650
39. Suárez J. (1998) Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Ingeniería de Suelos Ltda. Publicaciones UIS. Bucaramanga. Distribuido por Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos Ltda. Calle 41 # 28-33 Bucaramanga, Colombia.

40. Unidad Nacional de Gestión de riesgos de desastres (2022) Plan Nacional De Gestión Del Riesgo De Desastres (2° Ed). https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/PNGRD/PNGRD-2da-actualizacion.pdf
41. Unidad Nacional de Gestión de riesgos de desastres (2020, 10 junio) Cambio climático, visión desde la Gestión del Riesgo de Desastres. Disponible en: https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Cambio-climatico,-vision-desde-la-Gestion-del-Riesgo-de-Desastres.aspx
42. Unidad Nacional de Gestión de riesgos de desastres (2024) Eventos Registrados en Meses con Índice ONI Menor o igual a (-0.5). Colombia, Disponible en: https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Manejo/Eventos-Registrados-en-Meses-con-Indice-ONI-Menor-o-Igual-a-0-5.pdf
43. UNGRD, MINAMBIENTE (2023) Plan nacional de Gestión ante el Fenómeno "NIÑO". Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Bogotá. Disponible en: https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/PLAN-NACIONAL-DE-GESTION-ANTE-EL-FENOMENO-El-Nino.pdf
44. UNGRD, Gobierno de Colombia., (2018) Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes UNGRD Bogotá, D.C., Colombia. ISBN DIGITAL: 978-958-56478-9.3.
45. United States Agency for International Development - USAID (2015) A guide for USAID project managers bridges, contract no. EDH-I-00-08-00023-00 order no. OAA-TO-12-00057

- Revistas

1. Ayala-Rojas, L. E., Franco-Rojas, A., & Padilla-González, E. A. (2020). Evaluación de la eficiencia en disipación de energía en estructuras hidráulicas construidas con gaviones y material reciclado (neumático usado) mediante modelamiento físico a escala reducida. Revista UIS Ingenierías, 19(1), 143–154. https://doi.org/10.18273/revuin.v19n1-2020014
2. Campos J., Gonzalez J., Diaz S., Galán A., (2017) Metodología para la evaluación del riesgo y la priorización de inversiones en el mantenimiento de obras de drenaje transversal. Quinta Jornada de ingeniería de Agua. España. Disponible en: https://geama.org/jia2017/wp-content/uploads/ponencias/posters/rs6.pdf
3. Canales Alvarado, M. A., & Salazar Garrido, J. A. (2020). Estado del arte sobre el impacto de deslizamientos de suelo y roca en puentes. RDP Revista Digital De Posgrado, (1), 09–21. https://doi.org/10.22201/fesa.rdp.2020.1.02
4. CDKN, (2016) HISTORIAS POR DENTRO sobre desarrollo compatible con el clima. CDKN, Alianza Clima y Desarrollo
5. Córdoba S., Palomino R., Gámiz S., Castro Y., Esteban M., (2015) Assessing the impact of El Niño Modoki on seasonal precipitation in Colombia. Global and Planetary Change, Volume 124. ISSN 0921-8181, DOI: https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.11.003.
6. García, S., (2024, 12 de abril) Las ciudades y municipios de Colombia que rompieron récord de temperatura en marzo: uno alcanzó 43,8 °C. El Tiempo, Colombia. Disponible en: https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/ciudades-y-municipios-de-colombia-con-record-de-temperatura-en-marzo-2024-segun-ideam-3333334
7. Gordillo, F., S. Calderón, G. Romero, D. A. Ordóñez, A. Álvarez, L. Sánchez-Aragón y C. E. Ludeña. 2015. Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Sector Transporte. Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 259, Washington D.C.

8. Guardela. L.M (2020) Evolución de la política de cambio climático en Colombia. Vniversitas, vol. 69. DOI: https://doi.org/10.11144/Javeriana.vj69.epcc
9. IDEAM. (2015) Climatología Trimestral de Colombia. Colombia. Disponible en: http://archivo.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Climatolog%C3%ADa+Trimestral+para+Colombia+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango+y+Dorado%29.pdf/c2825963-c373-449a-a7cb-8480874478d9
10. J. C. Ramírez y J. M. de Aguas, "Escalafón de la competitividad de los departamentos de Colombia, 2019", serie Estudios y Perspectivas-Oficina de la CEPAL en Bogotá, N° 36 (LC/TS.2021/2; LC/BOG/TS.2020/1), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2021.
11. Moreno Farfán, L. (2023). Efectos de fenómenos hidrometeorológicos sobre el valor agregado municipal en Colombia (2011-2020). Universidad de los Andes. Disponible en: http://hdl.handle.net/1992/68009
12. Mussetta, P., Barrientos, M. J., Acevedo, E., Turbay, S., & Ocampo, O. (2017). Vulnerabilidad al cambio climático: Dificultades en el uso de indicadores en dos cuencas de Colombia y Argentina. *EMPIRIA. Revista de Metodología de las Ciencias Sociales,* (36), 119-147
13. Pardo J, Orbegozo M, López D. (2022) Infraestructura vial: Retos y oportunidades ante el cambio Climático. CORFICOLOMBIANA. Disponible en: https://investigaciones.corfi.com/documents/38211/0/(2022-10)%20Infraestructura%20y%20Cambio%20Clim%C3%A1tico-%20Estudios%20de%20Desarrollo%20Sostenible%20IE.pdf/f9d5be17-f6a6-b1fb-64ad-b35c3347fcd4
14. Pardo, R. (2018). Disipadores de energía - parte II: pozo y estanque amortiguador. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, *39*(3), 119-133. Recuperado en 24 de enero de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000300119&lng=es&tlng=es.

- Cibergrafía

1. Agudelo. J. (2022, 30 de agosto) Vías terciarias en Colombia: un reto para el desarrollo del país. Especiales. Disponible en: https://www.bancolombia.com/empresas/capital-inteligente/especiales/infraestructura-2022/vias-terciarias-en-colombia
2. AHM (2008, 28 de noviembre) Problemas con los enrocados y gaviones. Mantenimiento de Carreteras. Disponible en: https://mantenimientocarreterasyvias.blogspot.com/2008/11/problemas-con-los-enrocados-y-gaviones.html
3. Anónimo (s.f.) Impacto del fenómeno El Niño 1997-1998 en la infraestructura de agua y alcantarillado: La experiencia del Ecuador. Ecuador. Disponible en: https://www.eird.org/esp/cdcapra/pdf/spa/doc14591/doc14591.htm
4. Borges. G. J. (2024, 6 marzo). Cambio climático en América Latina y el Caribe. Hoja informativa. Disponible en: https://www.iadb.org/es/noticias/cambio-climatico-en-america-latina-y-el-caribe
5. Borré. H (2020, 7 abril). La Cámara de Comercio de Magangué y sus gestiones en el proyecto Interconexión vial Yatí – Bodega. Cámara de Comercio de Magangué. Disponible en: https://ccmagangue.org.co/v2/la-camara-de-comercio-de-magangue-y-sus-gestiones-en-el-proyecto-interconexion-vial-yati-bodega/
6. Botero A., (2022, 17 de abril) La Mojana, una intervención histórica. Departamento Nacional de Planeación. Gobierno de Colombia. Disponible en_ https://2022.dnp.gov.co/sala-de-prensa/Paginas/columnas/La-Mojana-una-intervencion-historica.aspx

7. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (s.f.) PRONÓSTICO DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS_ Y OCEANOGRÁFICAS. CIOH. Recuperado el: 13 de diciembre del 2024 de https://cioh.dimar.mil.co/meteorologia/PreCaMaritima.php?pmc=saa
8. Cedar Lake Ventures, Inc. Weather Spark. (08 de diciembre del 2024) Informes climatológicos con el tiempo por mes, día y hasta hora. ¡Ideal para planificar eventos y viajes! Revisado en: https://es.weatherspark.com/
9. Charfuelan, J. (2005) Apoyo técnico en los procesos de formulación, evaluación y ejecución del proyecto: Construcción de Box Culvert, apertura y pavimentación de vía nuevo accesos al barrio La Carolina por la licorera en la ciudad de Pasto. Universidad de Nariño, San Juan de Pasto. Disponible en: https://sired.udenar.edu.co/14529/1/67444.pdf
10. Congreso de Colombia. Decreto 2157 De 2017, Colombia.
11. Congreso de Colombia. Decreto 291 del 2004, Colombia.
12. Congreso de Colombia. Decreto 602 de 2017, Colombia.
13. Congreso de Colombia. Ley 164 de 1994, Colombia.
14. Congreso de Colombia. la ley 1523 del 2012, Colombia.
15. Congreso de Colombia. Ley 1682 de 2013, Colombia.
16. Congreso de Colombia. Ley 2169 de 2021, Colombia.
17. Congreso de Colombia. Ley 629 del 2000, Colombia.
18. Congreso de Colombia. Resolución 340 de 2005, Colombia.
19. Duque, Gonzalo. (2003). DINAMICAS DEL CLIMA ANDINO COLOMBIANO. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/41309251_DINAMICAS_DEL_CLIMA_ANDINO_COLOMBIANO
20. Erzilla A., (2024, 17 de enero) Partes de un puente: Cimentación, subestructura y superestructura. ULMA. Disponible en: https://www.ulmaconstruction.es/es-es/ulma/blog/partes-puente
21. El UNIVERSAL (2020, 30 de marzo) Puente Yatí – Bodega empezó a funcionar. EDITORA DEL MAR S.A. Disponible en: https://www.eluniversal.com.co/regional/bolivar/2020/03/30/puente-yati-bodega-empezo-a-funcionar/
22. Fondo de Adaptación. (2024) Glosario. Gobierno de Colombia. Disponible en: https://www.fondoadaptacion.gov.co/index.php/atencion-a-la-ciudadania/informacion-ciudadano/glosario.html
23. Fonde de Adaptación (2021, 29 de noviembre) Proyecto vial Yatí-Bodega si tiene garantizadas sus conexiones. Gobierno de Colombia. Disponible en: https://www.fondoadaptacion.gov.co/index.php/component/content/article/169-prensa/comunicados-de-prensa/comunicados-prensa-2018/353-comunicado-040-18.html
24. IDEAM (2024, 21 de agosto) Informe sobre el posible incremento de la temperatura global en el periodo 2024-2028. Gobierno de Colombia. Disponible en: https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/noticia/informe-sobre-el-posible-incremento-de-la-temperatura-global-en-el-periodo-2024-2028
25. INVIAS (2020, 30 de marzo) Fondo de Adaptación, entrega al INVÍAS la Interconexión Vial "Yatí – La Bodega" en Bolívar para ser puesta en operación. Gobierno de Colombia. Disponible en: https://www.invias.gov.co/index.php/sala/noticias/3772-fondo-de-adaptacion-entrega-al-inviasla-interconexion-vial-yati-la-bodega-en-bolivar-para-ser-puesta-en-operacion
26. INVIAS. (2023, 30 de diciembre) INVIAS invirtió $125.000 millones en atención de emergencias en las vías del país durante 2023. Gobierno de Colombia. Disponible en:

https://www.invias.gov.co/index.php/sala/noticias/5279-invias-invirtio-125-000-millones-en-atencion-de-emergencias-en-las-vias-del-pais-durante-2023

27. INVIAS. (2024) Informe consolidado al 7 de diciembre de 2024. Gobierno de Colombia. Disponible en: https://www.invias.gov.co/index.php/reporte-de-emergencias/18830-reporte-emergencias-mintransporte-7-de-diciembre-de-2024-7am-5pm/file
28. Iowa Department of Transportation (2015) Iowa's Bridge and Highway Climate Change and Extreme Weather Vulnerability Assessment Pilot. Federal Highway Administration, Disponible en: https://www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/resilience/pilots/2013-2015_pilots/iowa/final_report/page02.cfm
29. Gallo, D. (2024, 24 enero) Alerta en el mar Caribe por fuertes vientos y alto oleaje: estas son las zonas afectadas. Disponible en: https://www.infobae.com/colombia/2024/01/24/alerta-en-el-mar-caribe-por-fuertes-vientos-y-alto-oleaje-estas-son-las-zonas-afectadas/
30. Gallo, D. (2024, 26 enero) San Andrés, en emergencia: declaran calamidad pública por efectos del fenómeno de El Niño. https://www.infobae.com/colombia/2024/01/26/san-andres-en-emergencia-declaran-calamidad-publica-por-efectos-del-fenomeno-de-el-nino/
31. Gómez H., (2013) Metodología de Diseño y Cálculo estructural para muros de contención con contrafuertes en trasdós, Basados en un programa de cómputo. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá. Disponible en: https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/53/G%F3mez%20Rodr%EDguez,%20Herney%20Gustavo-2013.pdf;jsessionid=1FFE83DE63D81F6FD5CA5208F0870B52?sequence=1
32. Google Earth (s.f.) Google [En línea]. Revisado el 13 de diciembre del 2024 en: https://earth.google.com/web/@0,0,10a,0d,1y,0h,0t,0r/data=CgRCAggBOgMKATBCAggASg0I_____ARAA?authuser=0
33. López, M. (2018, 2 octubre). Carreteras, cambio climático y medidas de adaptación. Visiones. Disponible en: https://www.caf.com/es/conocimiento/visiones/2018/10/carreteras-cambio-climatico-y-medidas-de-adaptacion/
34. Jiménez A. (2022). Estimación cuantitativa de la vulnerabilidad de puentes frente a movimientos de masa. [Tesis de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Universidad de los Andes.
35. Martínez, G. (2020, 2 de abril). Tipos de pavimento. Conoce sus características y clasificación. Ingeniería y Construcción. Disponible en: https://www.ingenieriayconstruccioncolombia.com/tipos-de-pavimento/
36. Meza L., (2022, julio) EL FENÓMENO EL NIÑO Y SUS EFECTOS EN LAS OBRAS VIALES. Construyendo obras y vías. Disponible en: https://coovias.com/el-fenomeno-el-nino-y-sus-efectos-en-las-obras-viales/?srsltid=AfmBOoqPOZp8Bl-XfZTk9Fvn2TZHiAm-TEU9pSszp6vBKsQait1Kvc3E
37. Minnesota Department of Transportation's (2014) MnDOT Flash Flood Vulnerability and Adaptation Assessment Pilot Project. Federal Highway Administration, Disponible en: https://www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/resilience/pilots/2013-2015_pilots/minnesota/final_report/chap01.cfm
38. Muñoz H., (2022, 15 de noviembre) Millonaria inversión para ejecutar obras viales en veredas de Altamira. La Voz de la Región. Disponible en: https://lavozdelaregion.co/millonaria-inversion-para-ejecutar-obras-viales-en-veredas-de-altamira/
39. Neira, S. (2024, 24 septiembre) IDEAM emitió una alerta especial debido a la influencia del potencial ciclón tropical. Disponible en: https://www.infobae.com/colombia/2024/09/24/ideam-emitio-una-alerta-especial-debido-a-la-influencia-del-potencial-ciclon-tropical/

40. Oregon Department of Transportation (2015) Climate Change Vulnerability Assessment and Adaptation Options Study. Federal Highway Administration, Disponible en: https://www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/resilience/pilots/2013-2015_pilots/oregon/final_report/page00.cfm
41. Oregon Department of Transportation (2016) FHWA Climate Resilience Pilot Program: Oregon Department of Transportation. Federal Highway Administration, Disponible en: https://www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/resilience/pilots/2013-2015_pilots/oregon/
42. Pardo, R. (2018). Disipadores de energía - parte II: pozo y estanque amortiguador. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 39(3), 119-133. Recuperado en 24 de enero de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000300119&lng=es&tlng=es
43. Pérez, C. (2017, 18 de octubre). Tipos de gaviones y sus características mas relevantes. Parque y grama. Disponible en: https://www.parqueygrama.com/tipos-de-gaviones/
44. Ponce, V. (2018, febrero) Drenaje de carreteras. Perú. Disponible en: https://ponce.sdsu.edu/drenaje_de_carreteras_c.html
45. Quintero, D. (2023, 15 de enero) Cambio climático y erosión costera, Las playas están desapareciendo en Colombia. El Espectador. Disponible en: https://www.elespectador.com/investigacion/las-playas-de-colombia-que-estan-desapareciendo/
46. Revista Zetta (2015, 7 de abril) 10 consorcios buscan construir el puente de 12 Km entre Yatí y Bodega. Revista Zetta. Disponible en: https://revistazetta.com/?p=5474
47. Rodríguez, D. (2023, 6 de abril) Elija en qué clima colombiano puede vivir según las afecciones que tenga de salud. Disponible en: https://www.larepublica.co/especiales/mis-documentos-2023/elija-en-que-clima-colombiano-puede-vivir-segun-las-afecciones-que-tenga-de-salud-3586788
48. Ruiz, M., Guzmán, O., Arango, A., & Dorado, C. (2019). *Climatología trimestral para Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Revisado en: https://archivo.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Climatología+Trimestral+para+Colombia+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango+y+Dorado%29.pdf/c2825963-c373-449a-a7cb-8480874478d9
49. Sánchez, X. (2003) Diseño de pavimento articulados para tráfico medio y alto. Universidad de los Andes. Bogotá. Disponible en: https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/6f011213-8675-4efb-be13-9a294063ecb5/content
50. Servicio Geológico Colombiano (2023). ¿Por qué ocurren tantos movimientos en masa en el país y qué podemos hacer al respecto? Colombia. Revisado en: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Por-que-ocurren-tantos-movimientos-en-masa-en-el-pais-y-que-podemos-hacer-al-respecto.aspx
51. Suarez J. (2023, 10 de noviembre) Comportamiento de puentes en inundaciones. Erosión.com.co, Excelencia geotécnica. Disponible en: https://www.erosion.com.co/comportamiento-de-puentes-en-inundaciones/
52. Ucros. M. C. (2023, 5 Julio). Colombia puede alcanzar sus ambiciosas metas climáticas y aumentar su crecimiento económico. Comunicado de Prensa. Disponible en: https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2023/07/24/colombia-puede-alcanzar-sus-ambiciosas-metas-climaticas-y-aumentar-su-crecimiento-economico
53. UNGRD (2024, 18 de junio) Durante la primera temporada de lluvias, se registraron más de 700 emergencia en el país. Unidad Nacional de Gestión de Riesgos y Desastres (UNGRD). Revisado en: https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2024/Durante-la-primera-temporada-de-lluvias-se-registraron-mas-de-700-emergencia-en-el-pais.aspx#:~:text=en%20el%20pa%C3%ADs-

,Durante%20la%20primera%20temporada%20de%20lluvias%2C%20se%20registraron%20m%C3%A1s,700%20emergencia%20en%20el%20pa%C3%ADs&text=La%20Central%20de%20Informaci%C3%B3n%20y,durante%20la%20temporada%20de%20lluvias.

54. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs - OCHA (2023, 24 de octubre) Colombia: Exposición a riesgos e impactos por Fenómeno de El Niño - Proyecciones finales de 2023 e inicios de 2024. OCHA. Disponible en: https://www.unocha.org/publications/report/colombia/colombia-exposicion-riesgos-e-impactos-por-fenomeno-de-el-nino-proyecciones-finales-de-2023-e-inicios-de-2024-publicacion-24-de-octubre-de-2023
55. Villamarin S. (2013) Manual básico de diseño de estructuras de disipación hidráulica, Escuela politécnica del ejército, Sangolquí. Disponible en: https://es.slideshare.net/slideshow/manual-de-diseo-de-disipadores/46955203
56. Transportation Engineering Approaches to Climate Resiliency – TEACR (207) Wildfire and Precipitation Impacts to a Culvert: US 34 at Canyon Cove Lane, Colorado. Federal Highway Administration, Disponible en: https://www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/resilience/ongoing_and_current_research/teacr/colorado/