



RESILIENCIA CLIMÁTICA PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO  
DEL VALLE DE ABURRÁ – CASO DE ESTUDIO – LÍNEAS H Y M DEL METRO  
DE MEDELLÍN - COLOMBIA

Climate resilience for Aburrá Valley electric mass transit system -Case study –  
Lines H and M of Metro de Medellín -Colombia.

PAOLA ANDREA POSADA LONDOÑO

MARLY ANDREA LÓPEZ MUÑETÓN

Tesis de maestría

Carlos Fernando Cadavid

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN  
MAESTRÍA EN SOSTENIBILIDAD  
MEDELLÍN

2025

Lopez, M. A., & Posada, P. A. (2025). Resiliencia Climática para el Sistema de  
Transporte Masivo del Valle de Aburrá -Caso de estudio Líneas H y M del Metro  
de Medellín - Colombia.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	10
CONSIDERACIONES ETICAS .....	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
JUSTIFICACIÓN .....	13
OBJETIVOS.....	14
GENERAL .....	14
ESPECÍFICOS.....	14
MARCO TEÓRICO.....	15
DISEÑO METODOLÓGICO.....	19
.....	46
DESARROLLO DEL TRABAJO .....	20
RESULTADOS .....	45
DISCUSIÓN .....	49
PLAN DE ACCIÓN .....	50
INFOGRAFICO .....	52
CONCLUSIONES.....	53
APORTE A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE .....	55
IMPACTO DEL TRABAJO AL DESARROLLO SOSTENIBLE .....	56
BIOGRAFÍAS .....	57
AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS .....	58
REFERENCIAS.....	59
ANEXOS.....	62

## LISTA DE FIGURAS / ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Metodología de resiliencia climática</i> .....	19
<i>Ilustración 2. Localización del Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el contexto Nacional</i> .....	23
<i>Ilustración 3. Condiciones de Medellín, según fenómenos climáticos extremos</i> .....	24
<i>Ilustración 4. Tendencias que pueden alterar el equilibrio de ecosistemas, escenarios IDEAM.</i> .....	25
<i>Ilustración 5. Vulnerabilidades en la ciudad de Medellín</i> .....	26
<i>Ilustración 6. Características Generales Línea H</i> .....	27
<i>Ilustración 7. Trazado del Cable Línea H</i> .....	27
<i>Ilustración 8. Características Generales Línea M</i> .....	28
<i>Ilustración 9. Criterios de inclusión para las fuentes de información</i> .....	30
<i>Ilustración 10. Criterios de inclusión para las fuentes de información</i> .....	31
<i>Ilustración 11. Información definitiva según entidades y responsables de la información</i> .....	33
<i>Ilustración 12. Información definitiva según entidades y categoría de documentos</i> .....	33
<i>Ilustración 13. Amenazas para las líneas H y M de cables</i> .....	35
<i>Ilustración 14. Vulnerabilidades para las líneas H y M de cables</i> .....	36
<i>Ilustración 15. Clasificación probabilidad del riesgo</i> .....	37
<i>Ilustración 16. Clasificación del impacto</i> .....	37
<i>Ilustración 17. Mapa de calor, clasificación del riesgo</i> .....	38
<i>Ilustración 18. Riesgos climáticos líneas H y M.</i> .....	38
<i>Ilustración 19. Resultado de valoración de riesgos climáticos Líneas H y M</i> .....	39
<i>Ilustración 20. Activos críticos de acuerdo con el riesgo</i> .....	41
<i>Ilustración 21. Definición de la Gobernanza y el compromiso estratégico</i> .....	42
<i>Ilustración 22. Métrica de la resiliencia climática</i> .....	42
<i>Ilustración 23. Capacidad de anticipación</i> .....	43
<i>Ilustración 24. Capacidad de preparación</i> .....	44
<i>Ilustración 25. Capacidad de respuesta</i> .....	45
<i>Ilustración 26. Capacidad de adaptación y recuperación</i> .....	45
<i>Ilustración 27. Protección descargas eléctricas y lluvias intensas</i> .....	46
<i>Ilustración 28. Estabilización de la infraestructura y el terreno</i> .....	47
<i>Ilustración 29. Gestión operacional ante vientos fuertes y eventos extremos</i> .....	47

<i>Ilustración 30. Acciones y estrategias para la resiliencia climática .....</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 31. Plan de Acción metodología resiliencia climática.....</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 32. Estructura del Plan de Acción .....</i>	<i>51</i>
<i>Ilustración 33. Infográfico resiliencia climática.....</i>	<i>52</i>

## **DEDICATORIA**

Este trabajo sin duda es para todas aquellas personas que hicieron parte del proceso de formación, que nos dieron los elementos para poder desarrollarlo, también para todas esas personas que continuamente trabajamos por generar valor en el territorio, las personas y el ambiente.

Agradecemos al Metro de Medellín por brindar apoyo, conocimiento, información y disposición para el trabajo conjunto.

## RESUMEN

El contexto de movilidad a nivel nacional presenta grandes retos frente a aspectos como la eficiencia, sostenibilidad y seguridad para todos los usuarios y para la comunidad en general. La apuesta está enfocada a lograr movilidad sostenible para las ciudades, puesto que el aumento de la población, el tráfico vehicular, la contaminación atmosférica y en general el alto costo que deben pagar por los desplazamientos, han intervenido en la calidad de vida de las personas.

El desafío que enfrentan los gobiernos está enfocado a cómo adaptarse y ser resiliente al clima, cómo y cuándo el sector transporte debe actuar para recuperarse rápidamente y darle continuidad al negocio.

El presente trabajo de grado pretende proponer una metodología que tenga como contenido, las diferentes etapas para gestionar la resiliencia climática durante la operación de sistemas de transporte masivo. Específicamente, se tomará como caso de estudio la operación de las líneas H y M de los cables aéreos ubicados en el oriente de Medellín.

Si bien el sistema Metro opera diferentes modos de transporte como el metro, tranvía, buses y cables, se toman como referencia las líneas de cable H y M puesto que en la zona donde se encuentran ubicadas, se presentan características económicas, sociales y ambientales que inciden notoriamente en la condición climática de la zona de estudio, permitiendo identificar riesgos, tratamientos, controles y los costos evitados por implementar medidas para administrar integralmente los riesgos climáticos.

### **Palabras clave:**

Cambio Climático, Variabilidad climática, Resiliencia Climática, Adaptación, Acción por el Clima, riesgos climáticos, transporte.

## **ABSTRACT**

The growing challenges of mobility at the national level—particularly regarding efficiency, sustainability, and safety—require urgent responses to ensure quality of life for urban populations. Climate change has added an additional layer of complexity, demanding that transportation systems not only be efficient but also resilient. This thesis proposes a methodological framework for managing climate resilience in the operation of mass transit systems, with a focus on the Aburrá Valley in Colombia.

Using the H and M lines of Medellín's aerial cable system as a case study, this research identifies the key economic, social, and environmental factors that influence climate vulnerability in the area. The methodology outlines the stages necessary to assess risks, implement treatment and control strategies, and estimate the avoided costs resulting from proactive climate risk management. The study contributes to the development of tools that support climate adaptation in urban transport, strengthening continuity and sustainability in the face of extreme weather events.

### **Key words:**

Climate change, Climate variability, Climate resilience, adaptation, Climate action, Climate Risk, transport.

### MENSAJES DESTACADOS

**Resiliencia Climática**  
@Metodologiaresiliencia

La resiliencia climática es una necesidad, los sistemas de transporte masivo juegan un rol fundamental en la articulación interinstitucional para lograr un territorio más sostenible #ODS #Resiliencia #Sostenibilidad

**Resiliencia Climática**  
@Metodologiaresiliencia

🚧 Durante la temporada de lluvias, la alerta temprana de la empresa Metro esta lista para detectar cualquier anomalía que pueda afectar infraestructura del Metro, asegurando continuidad operativa y la seguridad para nuestros usuarios. 🌧️🌍 #ODS #MetrodeMedellin #Clima

**Resiliencia Climática**  
@Metodologiaresiliencia

El transporte juega un papel fundamental en la resiliencia climática, articula medidas de adaptación, mitigación, preparación y respuesta ante el cambio y la variabilidad climática. 🌍 #ODS #VariabilidadClimatica #CambioClimático

@eafit



### Resiliencia climática

@Metodologieresiliencia

La resiliencia climática en la Empresa Metro de Medellín tiene un enfoque sistémico pues estamos inmersos en otros sistemas, el conocimiento del entorno permite generar esa articulación para ser más resilientes al clima. #ODS #ResilienciaClimática #Vulnerabilidad



### Resiliencia Climática

@Metodologieresiliencia

#ODS #SBN #ResilienciaClimática: Las Soluciones Basadas en la Naturaleza como acciones para la resiliencia climática en la infraestructura de los sistemas de transporte masivo y el entorno cercano. ⚡



@eafit

## INTRODUCCIÓN

El transporte tiene un papel relevante en los territorios porque tiene el propósito de movilizar y conectar a sus habitantes, a nivel nacional e internacional los diferentes países buscan activamente oportunidades para avanzar hacia una movilidad más limpia e inteligente. La demanda del transporte aumenta cada vez más por el crecimiento poblacional y económico, lo que obliga a incorporar prácticas que permitan ser sostenibles.

Esa sostenibilidad debe permitir entre otras cosas, contrarrestar los efectos del cambio climático a través de la adaptación y la mitigación de este, la infraestructura de transporte es particularmente vulnerable a los efectos del cambio climático, como las temperaturas más altas, el aumento de las precipitaciones y las inundaciones adaptarse a los desafíos climáticos

Dadas las condiciones ambientales y sociales que representan los cables aéreos Líneas H y M para la ciudad de Medellín y en general para el Valle de Aburrá, además de los beneficios en ahorro de tiempo y ahorro económico, las afecciones de salud y la accidentalidad que se evita por la operación de este tipo de sistema, las emisiones de gases efecto invernadero y de contaminantes atmosféricos que se evitan por la utilización de energía eléctrica para su operación, se considera que es necesario desarrollar un trabajo enfocado a la resiliencia climática, que le permita al Metro de Medellín enfocar sus esfuerzos en una planificación estratégica tanto para la operación como para sus proyectos, que esta contemple todas las acciones o estrategias necesarias para contrarrestar los riesgos asociados a la variabilidad y el cambio climático, de tal forma que su gestión sea asociada desde la prevención más que de la corrección.

Esta identificación, valoración y tratamiento de los riesgos asociados a la variabilidad y el cambio climático, serán el punto de partida para establecer las estrategias que le permitan a esta organización operar las líneas H y M bajo una actuación de adaptación y recuperación consecuente con las necesidades del entorno.

## CONSIDERACIONES ETICAS

**Confidencialidad de la información:** para el desarrollo de este trabajo de grado en la definición de la metodología de resiliencia climática, los datos que se consideraron sensibles para la Empresa Metro de Medellín se mantuvieron de manera confidencial, limitando la divulgación de la totalidad de la información, sin embargo, los conocimientos adquiridos fueron aplicados para el desarrollo de la metodología.

También, las entrevistas realizadas a personas que hacen parte de academia y entidades territoriales se mantuvieron en confidencialidad pues la importancia radica en la obtención de la información técnica y perceptiva que hay detrás de los cargos y sus funciones.

**Derechos de autor:** A lo largo del desarrollo del trabajo de grado se propende por citar todos los documentos y páginas oficiales consultados y consolidarlos en las referencias bibliográficas.

**Uso y referenciación de la inteligencia artificial:** en cuanto al uso de la Inteligencia Artificial, se referencian todos los insumos, gráficos, información y demás elementos utilizados o realizados con la inteligencia artificial.

**Consentimiento informado:** Se cuenta con el consentimiento de la elaboración de este trabajo de grado desde el área de Administración de Riesgos de la Empresa Metro de Medellín, adicionalmente este trabajo de grado y su aproximación metodológica será implementada como parte de la planeación estratégica de la Empresa en cuanto a la resiliencia climática de la operación para el nuevo quinquenio.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático se adopta el Acuerdo de París como un mecanismo complementario para el control de la temperatura media mundial por debajo de los 2°C con respecto a los niveles preindustriales, pero además tener presente todas aquellas medidas que ayuden a contrarrestar los riesgos y todos los efectos del cambio climático. Colombia a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, define diferentes mecanismos de planificación a través de un sistema Nacional “SISCLIMA” el cual integra diferentes mecanismos y actores para poder gestionar y abordar las condiciones de adaptación y mitigación al cambio climático.

En el país se definen diferentes mecanismos que permiten planificar la adaptación y la mitigación al cambio climático, como el Plan Nacional de Adaptación al cambio climático (PNACC), la Estrategia Colombiana al cambio climático (ECDBC), la Estrategia Nacional para la Reducción de las emisiones debidas a la deforestación y la degradación forestal de Colombia (ENREDD+), el sistema de Comercio de Emisiones (Sistema RE), los Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático sectoriales (PIGCCS), la estrategia de Protección Financiera ante Desastres, la Estrategia 2050 (E2050), las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC), entre otras. Todos estos mecanismos de planeación han permitido adoptar lineamientos nacionales, regionales y locales tanto a las entidades públicas como privadas, sin embargo, el cambio climático es una realidad donde sus consecuencias afectan de manera significativa los territorios y sus dinámicas y es por esta razón, cada uno de los actores en sus territorios deben conocer y referenciar sus actividades, además de la forma en que éstas inciden en el entorno.

Dentro de lo que conocemos hoy, resulta complejo definir a ciencia exacta la magnitud de las alteraciones y daños que se han causado a los ecosistemas a causa de la variabilidad y el cambio climático. Las emisiones de CO<sub>2</sub> han crecido de manera exponencial en los últimos 100 años, debido a la demanda de combustibles fósiles que se encuentran asociados a la generación de energía para la producción industrial. A pesar de las voces de alerta con innumerables evidencias científicas, no se ha logrado actuar adecuadamente a nivel mundial y nacional. Los sectores económicos no han actuado a la velocidad que se requiere para promover acciones que reduzcan la utilización de los combustibles fósiles y demás compuestos asociados.

En ciudades pobladas como Medellín, donde cada vez se tienen eventos extremos más frecuentes e intensos, que causan impactos adversos con pérdidas y daños relacionados con la naturaleza y las personas, la vulnerabilidad y la exposición se vuelven criterios decisivos para trabajar temas de adaptación al cambio climático y en un concepto que engloba mucho más, ser resilientes a dichos cambios.

La resiliencia climática no solo es prepararse para los efectos del cambio climático, es aprender sobre esto y ajustar lo que sea necesario para volver a las “condiciones normales” en el menor tiempo posible. Es por esto por lo que los territorios deben impulsar continuamente el fortalecimiento de la resiliencia, la capacidad de adaptación y reducir la vulnerabilidad al cambio climático, se deberán entonces determinar las necesidades, invertir en infraestructura, procesos y procedimientos, para estar preparados con una seguridad operacional, donde se minimicen los costos económicos, ambientales y sociales.

## JUSTIFICACIÓN

Con el cambio climático nos enfrentamos a numerables desafíos que aún no alcanzamos a dimensionar su impacto, por lo tanto, todos los sectores deben estar preparados para afrontar sus implicaciones. Es entonces cuando aparece el concepto de resiliencia climática, que engloba muchos más que adaptación y mitigación del cambio climático, la resiliencia es entonces la manera en que nos anticipamos, nos preparamos, respondemos y nos recuperamos.

La necesidad que hoy presentan las empresas de conocer y gestionar sus riesgos climáticos hace referencia a la continuidad del negocio, la gestión del riesgo climático conlleva no solo a identificar y controlar las vulnerabilidades y amenazas, sino que además se deben establecer los tratamientos, los controles a través de estrategias preventivas y de atención a contingencias para poder contrarrestar el riesgo.

Si bien es cierto que la conciencia acerca de los riesgos climáticos ha aumentado notablemente, todavía a menudo las instituciones nacionales no están lo suficientemente preparadas para responder y prevenir los riesgos asociados a las nuevas y múltiples amenazas que afectan a distintos sectores. Es por esto por lo que se deben definir criterios para gestionar las diferentes etapas para los riesgos climáticos, para proteger a las empresas de posibles pérdidas o amenazas frente a su funcionamiento continuo.

## OBJETIVOS

### GENERAL

Estructurar una metodología que permita gestionar la resiliencia climática para los sistemas de transporte masivo en el Valle de Aburrá, específicamente para los cables línea H y M en el municipio de Medellín.

### ESPECÍFICOS

1. Diseñar la metodología de “Resiliencia climática” para la operación de las líneas de cables H y M en función de los grupos de interés y bajo criterios ASG (Ambiental, Social y Gobernanza).
2. Desarrollar el componente de variabilidad y cambio climático para la zona de influencia directa e indirecta del sistema de transporte Masivo del Valle de Aburrá.
3. Realizar la identificación de las amenazas climáticas para Medellín como municipio de mayor incidencia en la operación de las líneas de cables H y M.
4. Identificar, valorar y priorizar los riesgos climáticos para la operación de las líneas de cables H y M.
5. Definir los tratamientos para los riesgos asociados a la variabilidad y al cambio climático dentro de las condiciones técnicas y económicas de la Empresa Metro.
6. Calcular los costos evitados que se traducen como beneficios a los grupos de interés.

## MARCO TEÓRICO

Según las Naciones Unidas el Cambio climático se refiere a los cambios en un periodo de tiempo largo en los patrones y temperatura climáticas, que se dan de manera natural por la actividad solar, las grandes erupciones volcánicas, sin embargo, desde la revolución industrial, las actividades humanas han sido la principal fuente de estos cambios, sobre todo con la quema de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas. Estos combustibles generan gases, los cuales, generan emisiones de gases efecto invernadero que atrapan el calor del sol y genera un mayor aumento en las temperaturas. (Unidas, 2025)

Según el Plan de Acción ante el Cambio Climático y la Variabilidad Climática del Área Metropolitana del Valle e Aburrá 2019 – 2030 (AMVA & EAFIT, 2019) el sector de transporte, el sector de industria manufacturera y el sector residencial representaban el 92 % de las emisiones de GEI en la región metropolitana, es por eso que ejecución de corredores de movilidad urbana sostenibles (que funcionan bajo la matriz energética de energía verde, como es el caso de los sistemas asociados al Metro de Medellín) son la respuesta a las medidas de mitigación que se contemplan incluso en las Contribuciones Nacionales Determinadas.

En cuanto a las consecuencias del cambio climático tenemos aumento de la temperatura en la superficie de la tierra, mayor intensidad de lluvias, ciclones y huracanes, aumento de las sequías, aumento del nivel de mares y océanos y calentamiento de las aguas lo que provoca un deshielo de los polos. El aumento de temperatura también provoca desaparición de especies debido a el calentamiento de las aguas, incendios forestales, plagas y enfermedades, adicionalmente, al incrementar la temperatura se generan eventos meteorológicos cada vez más extremos, lo que pone en riesgo la salud alimentaria de las poblaciones más vulnerables o que dependen por ejemplo de los ecosistemas marinos para su supervivencia.

Según el Panel de Cambio Climático (2018) (IPCC, 2018) la resiliencia es la capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un suceso, tendencia o perturbación peligrosos respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura, y conservando al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación

Colombia se encuentra en el puesto 29 entre 191 países del Índice de Riesgo Climático por su vulnerabilidad debido a sus características geográficas, económicas y sociales, todo esto pone en jaque, la biodiversidad que alberga. Además, otras literaturas sostienen que en Colombia no hay una buena disponibilidad de data histórica sobre desastres, lo que limita reconocer y proyectar el verdadero índice de riesgo (Germanwatch, 2025)

Como empresa que administra un sistema de transporte masivo en el Valle de Aburrá e incluso su operación trasciende fronteras al operar el Metro de la ciudad de Quito, se hace indispensable generar lineamientos tanto para los nuevos proyectos como para las líneas que se tienen operando. las infraestructuras y operaciones del transporte terrestre, como carreteras y ferrocarriles, son altamente vulnerables a fenómenos climáticos extremos cada vez más frecuentes. Aunque muchos de los corredores del Plan Rector de Expansión se

han priorizado por su potencial de mitigación en cuanto a emisiones evitadas, se reconoce que la adaptación es esencial para fortalecer la resiliencia del sistema de transporte (Al-Humaiqani & Al-Ghamdi, 2022)

Existen diferentes vacíos en términos de investigación, planificación y gestión de los estudios sobre los riesgos climáticos, se puede decir que las estrategias que se tienen actuales se encuentran fragmentadas y requieren de un enfoque sistémico y multidisciplinario (Wang et al., 2020). La mayoría de los artículos encontrados corresponden a estrategias abordadas de adaptación urbana y regional, se encuentran pocos enfoques asociados a resiliencia climática específicamente en sistemas de transporte. y específicamente en el sector transporte se pueden determinar que se necesitan sistemas de transporte que resistan a eventos climáticos y activar el financiamiento para tecnologías resilientes.

*“La vulnerabilidad y la resiliencia son factores que, sumados al peligro, constituyen el riesgo de desastre. La vulnerabilidad, como elemento negativo de la ecuación del riesgo, útil para el diagnóstico de las carencias y debilidades de la comunidad, se entiende como incapacidad de la población de resistir, adaptarse y recuperarse frente a un evento que implique un cambio en la vida cotidiana. La resiliencia, elemento positivo de la misma ecuación, se presenta como una habilidad que construye la comunidad a partir de la experiencia, principalmente”* (Cardoso, 2019).

Sin embargo, al analizar (Crespo García & Arroyo, 2020) se plantea una metodología aplicable a proyectos nuevos como a infraestructuras ya existentes en sistemas de transporte para mejorar la resiliencia climática lo que puede generar un enfoque comparativo con el presente estudio. La resiliencia climática es una cuestión derivada del entendimiento que las estrategias +1.5°C y cero neto no se alcanzarán efectivamente. Es una cuestión que evoluciona más allá de los mecanismos de mitigación y adaptación, en el entendimiento de la emergencia por prevenir riesgos climáticos y transformar de modo contundente los sistemas socio ecológicos. En todos los ámbitos, es una estrategia en construcción y de ninguna manera puede decirse que se ha implementado satisfactoriamente como hecho concluido.

La Organización Meteorológica Mundial declaró que el 23 de julio de 2023 fue el día más caluroso de los últimos 120 años, confirma además que terminó la era del calentamiento global y que hemos entrado en un nuevo concepto de “ebullición global” (Rojas Morales, 2024) revela que Centroamérica carece del blindaje climático necesario para enfrentar la intensificación de olas de calor, alteraciones en los patrones de lluvia y aumento de vulnerabilidades sociales, económicas y ambientales. identifica falencias clave en la gobernanza y cumplimiento de los ODS, junto con pasivos ambientales y una limitada capacidad para reducir emisiones y abandonar el paradigma de desarrollo basado en combustibles fósiles Además, se advierte que, de mantenerse las tendencias actuales, la región enfrentará profundas pérdidas ecológicas y económicas, deterioro del tejido social y un incremento de desplazamientos climáticos hacia 2030 En respuesta, Rojas propone romper con el modelo actual y trazar una hoja de ruta con acciones climáticamente inteligentes e inclusivas, incluida la recomendación de crear un Observatorio Regional de Resiliencia Climática para fortalecer la investigación, monitoreo y educación continua frente a estos desafíos.

“La resiliencia del transporte ante el cambio climático y eventos extremos debe ir más allá de enfoques centrados únicamente en la infraestructura sólida y estructural. Es necesario considerar también elementos de flexibilidad y agilidad, que permitan adaptarse tanto a eventos previstos como imprevistos, y a interrupciones físicas y no físicas directas e indirectas. Esta visión ampliada reconoce que los sistemas de transporte son infraestructuras complejas, interconectadas y dinámicas, y que la resiliencia efectiva requiere la capacidad de transitar entre diferentes ‘regímenes de resiliencia’, no solo resistir impactos.” (Markolf et al., 2019). Algo importante a resaltar es que la infraestructura sólida se enfoca en resistir impactos mediante infraestructura reforzada; la resiliencia, en cambio, implica capacidad de respuesta, adaptación y transformación.

La capacidad de resiliencia también hablará de la planificación territorial, por lo tanto, habrá ocasiones que el enfoque de la adaptación de la infraestructura será precisamente generarla para garantizar que, en el momento de la materialización del riesgo, este la infraestructura para hacerle frente. (Cooperación Técnica Alemana, 2010)

Los principales riesgos del cambio climático para el transporte en América latina se centran en deslizamientos de tierra, inundaciones y olas de calor, donde los principales afectados son aquellas poblaciones que presentan mayores vulnerabilidades como la población de bajos ingresos ubicadas principalmente en laderas, migrantes o comunidades informales que no tienen acceso a la información y aquellas comunidades que se encuentran con deficiencias puntuales en la infraestructura como asentamientos a borde de quebrada o zonas de baja permeabilidad en suelos (Surico, 2020).

De acuerdo con (United Nations Environment Programme, 2024) se plantean los siguientes riesgos climáticos asociados al sistema de transporte: Tormentas e inundaciones, altas temperaturas (estrés térmico), sequías, escasez de agua, incendios, aumento del precio del carbono, restricciones políticas, avances tecnológicos en alternativas bajas en carbono, cambios en las preferencias del mercado, riesgo reputacional, cambio en el sentimiento inversor, riesgos legales.

Por otro lado, el informe de formulación del plan de acción ante el cambio y la variabilidad climáticos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá 2019-2030, establece que las manifestaciones del cambio climático que más inciden en el valle de Aburrá son: Aumento sistemático de la temperatura, aumento de la magnitud y frecuencia de las tormentas, aumento en la duración y en la frecuencia de los periodos con poca lluvia, aumento en la duración y en la frecuencia de los periodos de lluvia.

La planificación de la adaptación al cambio climático en infraestructuras de transporte urbano está limitada más por barreras institucionales que por las técnicas. Estas barreras incluyen la falta de comprensión del concepto de adaptación, escasa disponibilidad de recursos financieros, ausencia de información adecuada y estructuras normativas rígidas y fragmentadas. Superar estos obstáculos requiere una perspectiva sociotécnica, que integre no solo aspectos ingenieriles, sino también institucionales, políticos y sociales en la toma de decisiones (Cañavera Herrera & MacAskill, 2021)

En cuanto a autoridades ambientales y corporaciones autónomas el (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021) plantea que a nivel de país tienen la responsabilidad de prevenir, reducir y mitigar riesgos relacionado con fenómenos naturales y el cambio climático para estar alineados con los principios del Desarrollo Sostenible y el

enfoque se encuentra en conocer los riesgos, reducirlo y manejar los desastres desde la preparación, respuesta frente a emergencias y que la prevención del riesgo debe estar basada en los ecosistemas (Soluciones Basadas en la Naturaleza).

Por otro lado, (Vargas et al., 2022) sostienen que, al estar la naturaleza interconectada, así mismo se deben abordar los temas de resiliencia climática, en una interacción e interconexión a nivel de actores que engloban el sector público, sector privado, sociedad civil y academia, así como la cooperación de todos estos actores a nivel regional, local, nacional e internacional, pues finalmente, todos nos vemos afectados ante el cambio climático y sus consecuencias. Así mismo, se establece el papel crucial que tiene las políticas públicas, los incentivos y los desincentivos en las dinámicas sectoriales y territoriales.

Se puede observar con planteamientos como (Murillo Pérez et al., 2024) se da una mirada bastante integrativa y a nivel de la ciudad de Medellín donde se realiza un perfil de resiliencia climática, desde su diagnóstico ambiental y socioeconómico, el estado actual de la resiliencia urbana y culmina con una propuesta de las acciones específicas a adoptar para la resiliencia y la sostenibilidad.

El conjunto de riesgos y políticas que una empresa debe gestionar y equilibrar de manera cautelosa para tratar de lograr valor sostenible a corto, mediano y largo plazo, es la condición más favorable y la tendencia de las organizaciones en cualquiera que sea su propósito. Las condiciones políticas, ambientales, sociales, económicas y de gobernanza, son necesarias para afrontar de manera consistente todos los retos de las organizaciones, sin desconocer que sus directivos y toda su estructura administrativa deben enfocar sus esfuerzos más allá de los intereses particulares o empresariales y buscar finalmente la creación de valor sostenible a largo plazo, teniendo presente a cada uno de sus grupos de interés y en general las cuestiones en sostenibilidad en ASG.

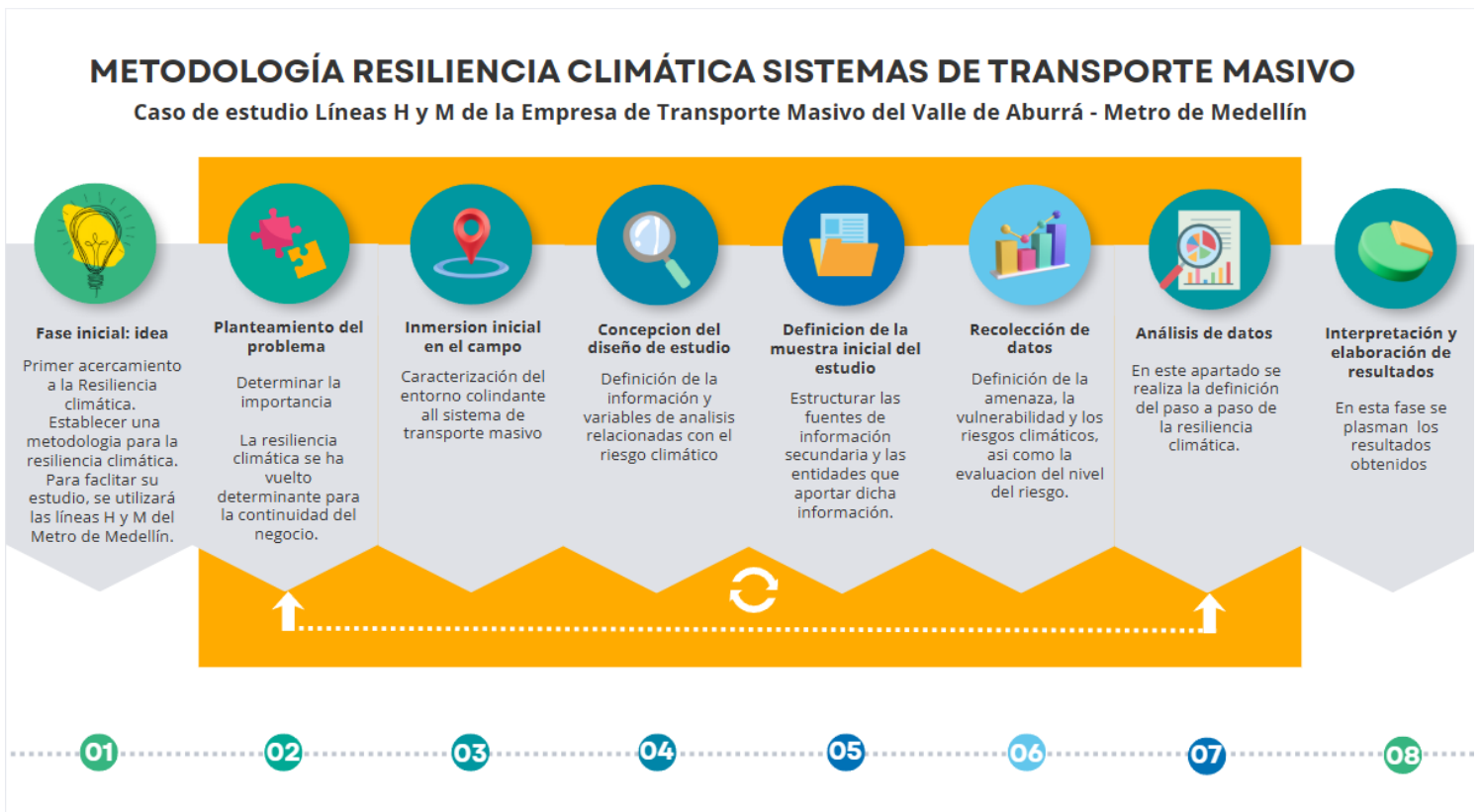
En el marco de ASG, el propósito deberá ser la prestación del servicio bajo un concepto ético y transparente, sin olvidar la rentabilidad del negocio, pero bajo una actuación responsable y sostenible, para garantizar el éxito y aumentar su valor a largo plazo.

Partiendo entonces de la generación de valor y teniendo presente las condiciones del entorno, se pretende desarrollar **“La Resiliencia climática para sistemas de transporte eléctricos en el Valle de Aburrá, Líneas H y M” del sistema Metro** tomando como referencia que la operación de un medio de transporte como los cables aéreos H y M buscan mejorar y facilitar la movilidad de la ciudad de Medellín y en especial la de las comunas 8, 9 y 10 de esta ciudad, a través de la sostenibilidad como la senda de planificación y aporte al territorio.

## DISEÑO METODOLÓGICO

Partiendo de los objetivos definidos para este trabajo de grado, en este capítulo se pretende definir las diferentes etapas que conformaran una metodología para la resiliencia climática de sistemas de transporte masivo e implementar el caso de estudio en Líneas de cables H y M.

Inicialmente se partirá de unos conceptos básicos o definiciones, el planteamiento de la necesidad, el tipo de investigación que realizaremos, el planteamiento de la solución, la recolección y el análisis finalmente de los datos obtenidos. Para una mejor estructuración de la metodología, a continuación, se realiza el respectivo desarrollo por fases (Anexo 01).



Fuente: Elaboración propia

## DESARROLLO DEL TRABAJO

### **Fase 1: Idea**

Dadas las condiciones de vulnerabilidad que hoy presentan los sistemas de transporte masivo en Colombia y teniendo presente la situación actual del territorio Valle de Aburrá frente a la variabilidad climática, se considera relevante y muy urgente, definir un marco estructurado que le permite al Metro de Medellín, a las organizaciones y a los demás sistemas de transporte masivo, contar con la aproximación de un paso a paso donde se pueda actuar de forma preventiva ante los diferentes impactos por los cambios abruptos del clima, actuar de manera anticipada, prepararse, responder oportunamente y finalmente, recuperarse después de la materialización de estos fenómenos.

Con la presente metodología, se pretende lograr una planificación de la operación desde la prevención, pero con el objetivo de minimizar los daños, ahorrar costos, asegurar la continuidad del negocio y finalmente, poder desarrollar la capacidad de adaptarse y ser resilientes frente a los acontecimientos que se presentan en el territorio.

### **Fase 2: Planteamiento del problema**

#### Contexto Internacional.

Partiendo del referente internacional de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, en su artículo 1, punto 2, Por "cambio climático" se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables (Naciones Unidas, 1992).

El cambio climático se ha convertido en una prioridad a nivel planetario, según Naciones Unidas, la actividad humana ha provocado el calentamiento de la atmósfera, la tierra y el océano, los cambios cada vez son más intensos y prolongados en cada una de las partes del planeta (atmósfera, el océano, la criosfera y la biosfera).

En el año 1997 se lleva a cabo el Protocolo de Kioto de la Comisión Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) como estrategia para lograr una reducción significativa de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>. Con este protocolo se establecieron unos objetivos de emisiones vinculantes para los países

desarrollados que ratificaron los objetivos de reducción, las responsabilidades comunes pero diferenciadas, los mecanismos de flexibilidad y el sistema de monitoreo, también contempla la adaptación a los efectos del cambio climático.

Los Acuerdos de Cancún, adoptados en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Clima celebrada en México (diciembre de 2010), incluyeron un amplio paquete de apoyo financiero, tecnológico y de creación de capacidades para ayudar a las naciones en desarrollo a adaptarse al cambio climático y a adoptar vías sostenibles hacia economías de bajas emisiones. Los acuerdos confirmaron que los países desarrollados movilizarían 100.000 millones de dólares anuales en financiación para el clima para los países en desarrollo de aquí a 2020, y establecieron un Fondo Verde para el Clima a través del cual se canalizo gran parte de la financiación (Uribe Rueda, 2022).

La "Plataforma de Durban para la Acción Reforzada", fue adoptada en la conferencia de la ONU en Sudáfrica (diciembre de 2011), acordó una hoja de ruta hacia un nuevo marco legal para 2015, aplicable a todas las Partes de la convención climática de la ONU. También contemplo un segundo período de compromiso del Protocolo de Kioto, a partir de 2013. También se llegó a un acuerdo sobre el diseño y las disposiciones de gobernanza del nuevo Fondo Verde para el Clima.(Uribe Rueda, 2022)

Finalmente, el Acuerdo de Paris que es tratado internacional fue adoptado por 196 partes de la COP 21 en Paris, el cual entró en vigor en noviembre de 2016. Se estableció como un tratado jurídicamente vinculante sobre el cambio climático. A través de este Acuerdo se limita el calentamiento global a un nivel muy inferior a los 2°C, se habla de lograr 1,5° grados centígrados a través de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> lo antes posible.(Naciones Unidas, 2016)

### Contexto Nacional.

Colombia es un país que ha venido participando activamente en las agendas internacionales frente a la gestión del cambio climático y esto ha permitido establecer una línea de acción a nivel nacional donde se han definido diferentes políticas, lineamientos y estrategias para aunar esfuerzos y cumplir con los compromisos internacionales por el planeta.

Por tratarse de un país altamente vulnerable al clima y a los efectos del cambio climático, se concibe como un asunto de alta prioridad que debe ser atendido de manera urgente. En la actualidad la problemática del cambio climático se considera como la mayor amenaza que está enfrentando el planeta.

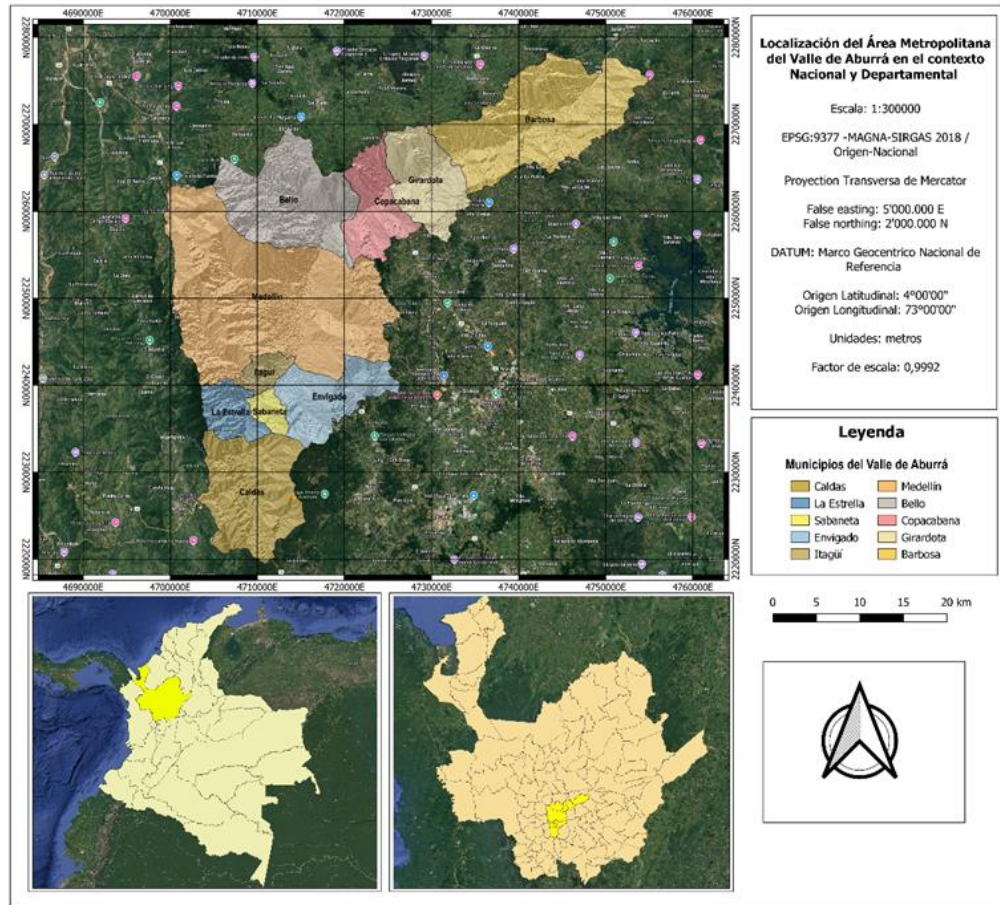
Para Colombia existe una serie de Hitos en relación con el cambio climático que se ha venido desarrollando a nivel país, trascendiendo a las regiones según las directrices estipuladas.

El documento de Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) 3700 de 2011 (Departamento Nacional de Planeación, 2011) fue una estrategia Institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia y estableció una estrategia para integrar dentro de los procesos de planificación e inversión de los sectores y territorios la problemática de desarrollo económico y social causada por el cambio climático. La Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC), ahora Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono Adaptada y Resiliente (ECDBCAR) (Desde 2011 a la fecha) fue el compromiso que el país asumió para desligar su crecimiento económico de la producción de GEI, y para lograr superar este reto, se creó la Estrategia Climática Integral y Transversal en Colombia.

Desde el año 1988 se crea el grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), para facilitar las evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta, para mantener el calentamiento global por debajo de los 2 °C, las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros gases de efecto invernadero (GEI) los cuales deben reducirse a la mitad para 2050 (en comparación con los niveles de 1990). En este sentido la importancia del IPCC es la generación de contenidos científicos y expertos a nivel mundial (Uribe Rueda, 2022).

### Contexto Local.

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá es una subregión ubicada en la zona centro-sur del departamento de Antioquia – Colombia. Su conformación político – administrativa está dada por la unión de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Itagüí, Envigado, Sabaneta, La Estrella y Caldas (Figura 1). Estos 10 municipios tienen como núcleo central al municipio de Medellín (capital del departamento de Antioquia) y comparten como eje estructurante el Río Aburrá, fuente hídrica que nace en el Alto de San Miguel y desemboca sobre Río Porce, a la altura de Puente Gabino (AMVA, 2017), el río recorre este valle de sur a norte, recibiendo una serie de afluentes a lo largo de su recorrido. El Valle tiene una longitud aproximada de 60 kilómetros y una amplitud variable, enmarcado por una topografía irregular y pendiente, con alturas que oscilan entre 1.300 y 2.800 metros sobre el nivel del mar (DAPARD, 2018).



*Ilustración 2. Localización del Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el contexto Nacional*

Fuente: Metro de Medellín LTDA 2025

Las condiciones topográficas de Medellín (Valle estrecho, rodeado de montañas) hacen que el clima se manifieste de una forma más intensa en las diferentes zonas de laderas que son sobresalientes en un gran porcentaje del territorio, lo que hace que presente un diagnóstico complejo y de alta vulnerabilidad frente a los diferentes fenómenos climáticos extremos en los últimos años. Adicionalmente, los diferentes afluentes del río Medellín y sus múltiples ocupaciones en zonas de laderas, hacen que exista una mayor vulnerabilidad en el recurso, pero además en las comunidades que se asientan en estas zonas.

La topografía, la alta densificación de Medellín y el crecimiento urbano conjugados con la variabilidad climática, agrava los riesgos a los que está continuamente expuesto el territorio en el Valle de Aburrá. De acuerdo con las condiciones que hoy

presenta la ciudad de Medellín frente a los fenómenos climáticos extremos en las diferentes zonas, este es el diagnóstico del territorio.

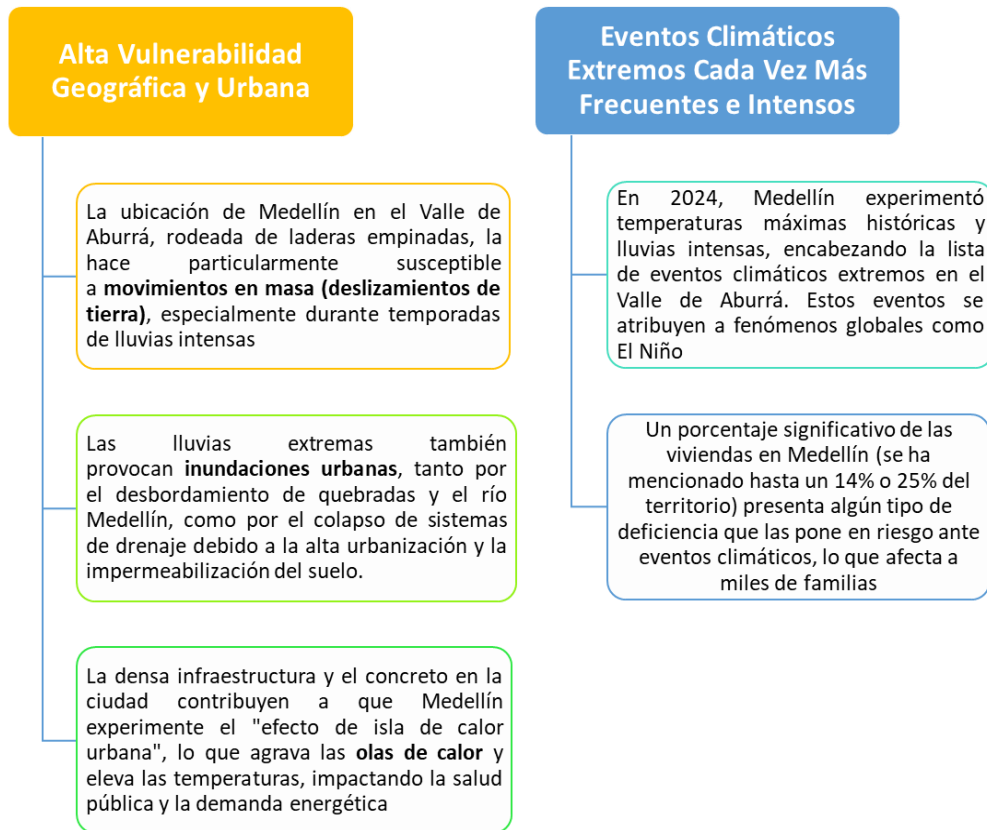


Ilustración 3. Condiciones de Medellín, según fenómenos climáticos extremos

Fuente: Elaboración propia mediante IA Gemini

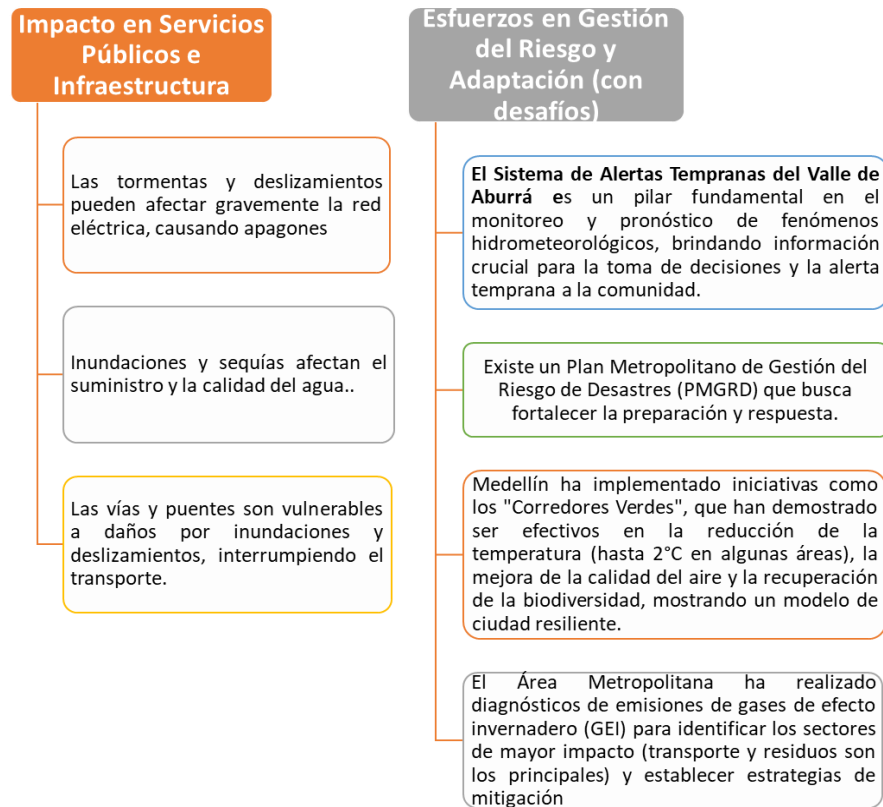


Ilustración 4. Tendencias que pueden alterar el equilibrio de ecosistemas, escenarios IDEAM.

Fuente: Elaboración propia Mediante IA Gemini

Ahora bien, con los fenómenos de variabilidad climática que se viene presentando en los últimos años, la vulnerabilidad en Medellín y sus diferentes barrios ha crecido continuamente y se describen los diferentes eventos que se presentan en Medellín a causa de la variabilidad climática:

<b>Vulnerabilidades en la ciudad de Medellín</b>	
<b>Geografía y Topografía</b>	El valle y las laderas empinadas son una vulnerabilidad natural. La ocupación de zonas de riesgo es un factor crítico que convierte las amenazas en desastres
<b>Densidad Poblacional y Urbanización Informal</b>	Una gran parte de la población vive en zonas de alta pendiente y con construcciones precarias, lo que las hace altamente vulnerables a deslizamientos.
<b>Infraestructura Envejecida e Insuficiente</b>	Aunque Medellín ha invertido en infraestructura, algunos sistemas de drenaje y contención no están diseñados para las nuevas intensidades de lluvia, y la constante expansión urbana genera presión adicional.
<b>Servicios Públicos</b>	Los eventos extremos que se vienen presentando en Medellín como los fuertes vientos, la caída de árboles, los deslizamientos, pueden ocasionar daños en redes de acueducto y alcantarillado, además, puede ocasionar la caída de postes, torres de transmisión y cables. Las altas temperaturas pueden sobrecargar los sistemas de refrigeración y dañar los transformadores.
<b>Salud pública</b>	En la ciudad de Medellín viene en aumento las enfermedades respiratorias y transmitidas por vectores debido a cambios en patrones de temperatura y humedad. Además, de las condiciones de contaminación que se desatan por las lluvias y los vientos que circulan continuamente en el Valle de Aburrá y que provienen de zonas densamente construidas. También las ya mencionadas enfermedades relacionadas con el calor.
<b>Sistema de transporte masivo “Metro de Medellín”</b>	Es un sistema que se encuentra conformado por líneas de metro, tranvía, cables aéreos y buses (BRT). Las líneas terrestres y aéreas del sistema son sensibles a deslizamientos, inundaciones en estaciones o vías, afectaciones por vientos, especialmente para el sistema de cables que se encuentran ubicados en los costados oriental y occidental de Medellín.
<b>Sistema de transporte masivo “transporte público colectivo”</b>	El sistema de la red vial en Medellín también sufre diferentes consecuencias por la vulnerabilidad que presenta frente a eventos de deslizamientos, vientos, inundaciones en deprimidos y zonas cercanas a quebradas y al río Aburrá.

*Ilustración 5. Vulnerabilidades en la ciudad de Medellín*

Fuente: Elaboración propia

### **Fase 3: Inmersión inicial en el campo**

Dentro de la zona directa de estudio, se realizaron diferentes actividades para el reconocimiento de campo, visitas, entrevistas, registro fotográfico y la obtención de la información requerida como el reglamento de operaciones, generalidades de cables aéreos.

Inicialmente, para definir la ubicación y las características físicas se toma como referencia el contexto bajo el cual se aplicará la metodología de la zona directa de estos sistemas se encuentra en la ciudad de Medellín, específicamente en la comuna 8, de la siguiente forma:

#### **Línea H:**

#### **Contextualización del Cable Línea H-Oriente**

Este cable inicia en la estación Alejandro Echavarría del sistema tranviario, cuenta con diecisiete (17) pilonas, en donde la primera se localiza sobre la cota 1628,7msnm para llegar finalmente a la cota de abordaje en la estación final a los 1826msnm. En la siguiente tabla se muestran las características principales de este cable y en la figura el trazado general en su localización espacial en la comuna 9 (Buenos Aires). Los barrios beneficiados por la línea de cable H son Villatina, San Antonio, Villa Liliam, Villa Turbay y La Sierra.

CARACTERÍSTICAS	DATO	CARACTERÍSTICAS	DATO
Longitud horizontal (m)	1.409	Número de estaciones	3
Desnivel (m)	197	Velocidad máx. (m/s)	5
Longitud según la pendiente (m)	1.412	Capacidad instalada (pax/h)	1.800
Pendiente Promedio	14%	Estación motriz	Oriente
Pendiente Máxima	47.6%	Estación intermedia	Las Torres
Número de telecabinas	44	Estación retorno	Villa Sierra
Número total de telecabinas	40	Numero de pilonas	10

Ilustración 6. Características Generales Línea H

Fuente: Metro de Medellín -



Ilustración 7. Trazado del Cable Línea H.

Fuente: Metro de Medellín

Respecto a las estaciones, estas son las características de cada una de ellas.

**Estación inicial – Oriente:** Ubicado en el barrio Villatina esta estación es el punto de transferencia entre la línea tranviaria y la línea H, se tienen dos accesos generales y uno para Población de Movilidad Reducida e igual número para la salida del sistema, la zona paga contempla la plataforma de acceso al sistema de cables y las rampas de acceso al nivel de la línea del tranvía.

**Estación intermedia:** esta estación es el punto intermedio que da acceso a los barrios San Antonio, Villatina, Villa Liliam y Las Estancias.

**Estación final – La Sierra:** Ubicada en la parte alta del barrio La Sierra, esta estación cuenta al igual que la intermedia con un área para la subestación eléctrica y planta de emergencia, cuarto de equipos electrónicos. En el acceso se tienen dos puertas generales y una para PMR, al igual que para la salida del sistema.

## LINEA M

Los barrios beneficiados por la línea de cable M son: Miraflores, El Pinal, y Trece de Noviembre.

**Estación Inicial - Miraflores:** Conecta el Tranvía de Ayacucho Línea T.

**Estación Intermedia - El Pinal:** Estación intermedia de la línea.

**Estación final - Trece de Noviembre:** Estación final de la línea.

CARACTERISTICAS	DATO	CARACTERISTICAS	DATO
Longitud horizontal (m)	1.057	Numero de estaciones	3
Desnivel (m)	–	Velocidad máx (m/s)	5
Longitud según la pendiente (m)	–	Capacidad instalada(Pax/h)	2.500
Pendiente promedio	27%	Estacion motriz	Miraflores
Pendiente Máxima	53%	Estacion intermedia	El pinal
Numero de telecabinas	50	Estacion retorno	Trece de Noviembre
Numero total de telecabinas	51	Numero de pilonas	11

*Ilustración 8. Características Generales Línea M*

Fuente: Metro de Medellín

### **Características naturales de la zona de estudio**

La metodología para seguir es caracterizar desde el componente natural la zona de estudio, para esto, se extrajo información del estudio ambiental elaborado por la Empresa Metro de Medellín con el consultor IASCOL, a continuación, se relacionan aquellas variables más importantes extraídas de esta caracterización, sin embargo, se puede remitir al Anexo 02, donde se encontrará más detalle sobre la caracterización ambiental de estos corredores de movilidad.

### **Fase 4: Concepción del diseño del estudio**

Para esta fase de la metodología de Resiliencia climática en el sistema de transporte masivo Líneas H y M, se define como enfoque metodológico el mixto, donde se utilizan datos cuantitativos (indicadores, costos evitados, externalidades, las frecuencias de suspensión del servicio por el clima, entre otras) y datos cualitativos (procedimientos, manuales, conceptos, percepciones, planeación estratégica, entre otros).

Como tipo de estudio se define el estudio de caso para la resiliencia climática de las líneas de cables H y M, donde se busca definir específicamente la metodología para que estos sistemas de cables sean resilientes al clima bajo las condiciones de variabilidad climática de la ciudad de Medellín. El alcance para esta metodología será de tipo descriptivo frente al paso a paso que se deberá seguir para preparar estos sistemas de transporte en generar, de dónde se puede extraer la información y finalmente, para nuestro caso de estudio, de los cables frente a los cambios drásticos del clima en Medellín y explicativo respecto al contenido de cada uno de los pasos, frente a contexto, datos, análisis de datos, planes de acción, presupuestos, entre otros. Específicamente para el explicativo, se definirá como la empresa Metro deberá anticiparse, prepararse, responder y recuperarse ante los diferentes impactos negativos del cambio climático.

Ahora bien, se ha venido mencionando en los diferentes capítulos de este trabajo a la Empresa Metro de Medellín limitada como la entidad general donde se materializa el fenómeno de resiliencia, en este caso es la unidad de análisis principal y sus cables líneas H y M son las unidades de muestra, quiere decir, los elementos a los cuales se les realizará el estudio.

Respecto el periodo de tiempo para el desarrollo de esta metodología, se tendrá presente el inicio de operación de las líneas de cables M, que en este caso corresponde al año 2019 y es a partir de este año que comienza a obtenerse información para ambas líneas. Ahora bien, en el presente documento se ha venido contextualizando el cambio climático desde el concepto global, por ser una

problemática que trasciende al ser un sistema interconectado, donde las alteraciones en una parte afectan a todas las demás, provocando impactos a escala planetaria. En este sentido, de lo global la escala sigue en lo nacional, luego en lo regional para llegar a lo local, donde se enfocará el ámbito geográfico la ciudad de Medellín.

Para la toma de muestras de información, se ha decidido tener presente diferentes criterios para seleccionar la información clave para la construcción de la metodología. En el desarrollo inicial de la metodología, se trabajó bajo criterios de exclusión, donde se eliminaron algunas fuentes de información que podían sesgar los diferentes hallazgos para el desarrollo de la metodología.

Se tomó la decisión de utilizar el criterio de inclusión, donde se estableció que o quien formará parte del estudio, para este caso, se mencionan los diferentes informantes para la metodología con su respectiva técnica.

*Ilustración 9. Criterios de inclusión para las fuentes de información*

Informante	Técnica	Tipo de dato	
		Cualitativo	Cuantitativo
Expertos en la gestión de riesgos	Entrevistas	X	
Expertos en infraestructura	Documentos Oficiales	X	X
IDEAM	Página oficial, Documentos oficiales	X	X
Área Metropolitana	Página oficial, Documentos oficiales	X	X
Distrito de Medellín	Entrevistas, Página oficial, Documentos oficiales	X	X
Academia	Página oficial, Documentos oficiales	X	X
Gobernación de Antioquia	Entrevistas, Página oficial, Documentos oficiales	X	X
DAGR D	Página oficial, Documentos oficiales	X	X
DAGRAN	Página oficial, Documentos oficiales	X	X

Fuente: Elaboración Propia

Para el plan de análisis de datos, se tuvo en cuenta los datos cualitativos y los cuantitativos, para lo cual se realiza la siguiente descripción.

### **Datos Cualitativos**

- ✓ **Información teórica.** en esta clasificación se tiene toda la información relacionada con las diferentes entidades que tienen incidencia directa en el tema de variabilidad climática y cambio climático. Se parte inicialmente de la Empresa

Metro, que es la fuente principal para todos los datos primarios y secundarios, en este caso los relacionados con la planificación estratégica, el sistema de gestión integral, la operación de las líneas de cables H y M, estudios ambientales y sociales de los corredores y demás información relacionada con la infraestructura. Respecto a las demás entidades, la información relacionada con diagnósticos, análisis de datos, estudios particulares y demás narrativas definidas de acuerdo con su alcance y jurisdicción.

- ✓ **Temas centrales.** Como temas centrales de esta metodología, se parte inicialmente de los conceptos y diagnósticos de la variabilidad climática, el cambio climático, la adaptación, mitigación y resiliencia climática. Se tendrá presente el impacto positivo neto como parte del hacer para lograr la resiliencia climática para la Empresa, buscando minimizar los efectos adversos del cambio climático y la mejora continua en función de la regeneración.
- ✓ **Software.** Respecto al software utilizado como fuente de consulta, en este caso se utilizará ARGIS y Scopus.

### **Datos Cuantitativos**

- ✓ **Información teórica.** en esta clasificación se tiene toda la información relacionada con las diferentes entidades que tienen incidencia directa en el tema de variabilidad y cambio climático, así como el ya mencionado marco teórico.
- ✓ **Variables.** Como variables incorporadas, a continuación, se clasifican dependiendo del tipo de entidad.

*Ilustración 10. Criterios de inclusión para las fuentes de información*

Entidad	Variables
Metro de Medellín	Frecuencias de cables Paradas Desviaciones Tiempos de operación
AMVA	Plan de Acción ante el Cambio y la Variabilidad Climática del Área Metropolitana del Valle de Aburrá – 2019-2030
IDEAM	Sistemas de información
SIATA	Informe hidrometeorológico: Precipitación Gestión del riesgo Hidrología Movimientos en masa Descargas eléctricas Información satelital

Entidad	VARIABLES
	Vientos Variables térmicas Pronósticos
Distrito de Medellín	Plan de acción Climática (PAM)
Academia	Referenciación bibliográfica sobre riesgos climáticos de Medellín
Gobernación de Antioquia	Plan Integral de Cambio Climático de Antioquia PICCA

Fuente: Elaboración Propia

- ✓ **Software.** Respecto al software que se utilizará para la metodología para los datos cuantitativos, en este caso se tomará como referencia la información asociada al Sistemas de información o enlaces destacados del IDEAM y del SIATA.

Ahora bien, la consulta y recopilación de información se ha venido realizando de tal forma que se aplique la confidencialidad en las diferentes entrevistas que se han dado, de tal forma que la participación de estos ha sido de forma voluntaria y con un conocimiento total del objeto de este trabajo de grado.

Y como parte final de esta fase, las autoras de esta metodología, hemos recurrido a las diferentes fuentes de información que se definieron con búsqueda de referencias y fuentes bibliográficas, tanto internacionales, como nacionales y locales. Estas fuentes corresponden a los informantes locales que cuentan con información primaria de la operación de los cables línea H y M para el caso de Metro de Medellín, las condiciones locales frente al clima que es el caso del IDEAM, Distrito de Medellín, Área Metropolitana, la Academia y la gobernación de Antioquia y para la atención de riesgos y desastres, el DGRD y el DAGRAN.

También se ha realizado el proceso de verificación para la información que es posible verificar a nivel local, la información internacional se ha utilizado para los procesos de referenciación secundaria, especialmente en los temas de diagnóstico y referencia de buenas prácticas.

### **Fase 5: Definición de la muestra inicial del estudio y acceso a esta**

En esta fase se pretende definir explícitamente todas aquellas entidades e informantes de éstas que suministraron información a través de documentos, entrevistas, informes, percepciones, entre otras. Retomando el criterio de inclusión que se definió en la fase anterior, a continuación, se presenta el listado de la información definitiva que ha sido entregada por cada uno de los informantes por entidades y la especificidad de la categoría de documentos que se analizaron.

Ilustración 11. Información definitiva según entidades y responsables de la información

Entidad	Informante	Documentación
		Documentos, enlaces, entrevistas
Metro de Medellín Limitada	Expertos en la gestión de riesgos	-Entrevistas
	Expertos en infraestructura	-Documentos Oficiales -Entrevistas
IDEAM	Página oficial	-Comunicación Nacional de cambio climático -Pronósticos hidrometeorológicos -Pronósticos deslizamientos
Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA.	Responsables de cambio climático, gestión del riesgo	-Informe de formulación del Plan de Acción ante el cambio climático y la Variabilidad climática del Área Metropolitana del Valle de Aburrá 2019-2030.  Monitoreo del estado del canal de Río Medellín.
SIATA	Página oficial	Informes hidrometeorológicos
Distrito de Medellín	Secretaría de Medio Ambiente	Plan de acción Climática (PAM)
Academia	Personal docente experto	Referenciación bibliográfica sobre riesgos climáticos de Medellín
Gobernación de Antioquia	Secretaría de Ambiente y Sostenibilidad	Plan Integral de Cambio Climático de Antioquia PICCA

Fuente: Elaboración Propia

Ilustración 12. Información definitiva según entidades y categoría de documentos

Entidad	Documentación
	Documentos, enlaces & entrevistas
Metro de Medellín Limitada	Procedimiento de la operación de cables
	Estudios ambientales para los cables Líneas H y M
	Metodología de análisis de riesgos
	Catálogo de riesgos generales de la operación
	Documento de referencia
	Informes de siniestros e interrupciones
	Plan de gestión del riesgo y desastres
IDEAM	Página oficial
Área Metropolitana del Valle de Aburrá	Informe de formulación del Plan de Acción ante el cambio y la variabilidad climática del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
Distrito de Medellín	PAC (Plan de Acción Climática)

	Plan de Ordenamiento Territorial -POT-
Academia	Referencias bibliográficas
Gobernación de Antioquia	Plan Integral de Cambio Climático de Antioquia PICCA

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con la información relacionada, se procedió con la revisión de cada uno de los documentos, de tal forma que se pudo obtener la información clave para la construcción de la metodología, que en este caso permite definir el marco institucional y real para definir la resiliencia climática en las dos líneas de cable H y M.

Dentro del marco institucional se agrupan la estructura, las políticas, los acuerdos y los lineamientos que deben regir para la gestión del riesgo climático, como responder a la planeación de este y la respuesta que se debe asumir para su control, corrección y mitigación, buscando la resiliencia del sistema de cables. En la siguiente fase se procederá a detallar el marco institucional de acuerdo con la agrupación mencionada.

Dado que el trabajo de grado es realizado por dos profesionales de sostenibilidad de la Empresa Metro de Medellín, la gestión interna requerida para la obtención de la información en el Metro de Medellín, se realizó a través de un proceso de acceso formal donde se remitió oficio a la jefa del área de Administración de riesgos informándole el propósito del trabajo de grado en “Resiliencia climática en el sistema de transporte masivo, caso de estudio línea H y M”, y solicitando la debida autorización. Este proceso se realizó a través de diálogos internos y de remisión de correo para validación de oficio, para su posterior firma de aprobación.

Respecto a las diferentes herramientas para formalizar la participación de los informantes, se procedió a utilizar solicitudes a través de correos electrónicos, consultas en el sistema de gestión integral de la Empresa, solicitudes de documentos relacionados con la operación de los cables H y M, consulta de documentos relacionados con la construcción de los cables y demás documentos que tienen incidencia directa con la administración y gestión de riesgos de la Empresa Metro.

Muestra inicial se define entonces a la lista concreta, específica y justificada de cada uno de los elementos necesarios para definir la resiliencia climática en el Metro de Medellín. En la siguiente fase se desarrollan cada uno de estos elementos con su respectivo contenido metodológico.

## **Fase 6: Recolección de datos (amenazas, vulnerabilidad y riesgos climáticos)**

En esta fase se desarrolla el marco metodológico para la resiliencia climática de las líneas H y M de los cables del Metro de Medellín, partimos inicialmente del estado actual de la gestión integral de riesgos climáticos. Se identifica en primera instancia las amenazas, vulnerabilidades y riesgos climáticos para las líneas objeto de esta metodología. A continuación, se presentan cada una de las etapas como punto de partida para definir la capacidad de la resiliencia actual y el análisis de brechas en resiliencia climática.

### **Delimitación y priorización del Riesgo climático**

El primer paso en esta etapa es la definición de las amenazas y las vulnerabilidades a las que se encuentran sometidas las líneas H y M de los cables.

*Ilustración 13. Amenazas para las líneas H y M de cables*

Amenazas	Impacto potencial		
	Personas	Infraestructura	Medio ambiente
Inundaciones	Riesgo de atrapamiento, lesiones y muertes en estaciones cercanas a la quebrada Santa Elena	Daños en patios, estaciones, pilonas y sistemas eléctricos a nivel del suelo	Contaminación de las quebradas cercanas a los cables, erosión
Deslizamientos	Atrapamiento de personal y pasajeros, lesiones graves	Daños en patios, estaciones, pilonas y sistemas eléctricos a nivel del suelo, accesos a estaciones	Alteración de taludes y pérdida de cobertura vegetal
Caída de árboles	Lesiones o muerte	Daños a infraestructura, equipos, vehículos, herramientas	Afectación a fauna, daño al ecosistema
Sismos y terremotos	Lesiones masivas, caídas de estructuras sobre usuarios	Colapso de puentes, túneles, estaciones y cables	Alteración del cauce de la quebrada Santa Elena y movimiento de suelos
Incendios forestales	Afectación por inhalación de humo y calor	Daños en catenarias y cableado aéreo	Pérdida de vegetación, contaminación atmosférica
Eventos atmosféricos	Lesiones por descargas eléctricas o caída de objetos	Afectación de sistemas eléctricos, techos y cables	Aumento de residuos por daños, contaminación hídrica por arrastre
Avenidas torrenciales	Riesgo de arrastre y atrapamiento de personas	Destrucción de puentes y vías férreas en quebradas	Erosión, sedimentación en el río y quebradas

Con base en las amenazas identificadas para estas líneas de cables, se procede con la identificación de las vulnerabilidades a que están sometidas las personas, la infraestructura y el entorno.

Ilustración 14. Vulnerabilidades para las líneas H y M de cables

Cables Línea H y M			
Amenaza	Vulnerabilidad personas	Vulnerabilidad infraestructura	Vulnerabilidad entorno
<b>Inundaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Servidores, contratistas y usuarios que se encuentran en estaciones y vías aledañas a cuerpos de agua.</li> <li>* Comunidad que vive en zonas aledañas a quebradas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Estaciones cercanas a la quebrada Santa Elena</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Comunidad cercana a la quebrada</li> <li>* Infraestructura existente en el entorno de estaciones (física, verde, entre otros)</li> </ul>
<b>Deslizamientos / Socavación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Servidores, contratistas y usuarios que se encuentran en estaciones y vías aledañas a taludes.</li> <li>* Comunidad que vive alrededor con zonas de taludes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Estaciones con taludes cercanos</li> <li>* Estaciones con taludes cercanos a la quebrada Santa Elena, que son más propensos a socavación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Usuarios en cabinas que pueden caer ante un deslizamiento o socavación que afecte una pylona.</li> <li>* Infraestructura externa cerca a pilonas</li> </ul>
<b>Caída de árboles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Servidores y contratistas que trabajan en plazoletas y vías férreas.</li> <li>* Transeúntes, ocupantes de vehículos y residentes de viviendas cercanas al Sistema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Árboles cercanos a estaciones y cabinas</li> <li>* Infraestructura en plazoletas cercana a árboles (como locales comerciales)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Alta afluencia de usuarios y presencia de comunidad.</li> <li>* Redes de servicios públicos y locales externos en las plazoletas</li> <li>* Vehículos y viviendas aledañas</li> </ul>
<b>Sismos y terremotos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Servidores, contratistas, usuarios y comunidad en situación de discapacidad y/o movilidad reducida.</li> <li>* Adultos mayores y niños</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Infraestructura ubicada en zonas de ladera (estaciones y pilonas)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Dificultad de evacuación de usuarios en cabinas suspendidas entre estaciones</li> <li>* Usuarios en estaciones expuestos a caídas de objetos o estructuras</li> </ul>
<b>Incendios forestales y de coberturas vegetales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Personas con antecedentes de problemas respiratorios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Infraestructura expuesta a altas temperaturas</li> <li>* Estaciones y vías cercanas a zonas verdes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Infraestructura existente en el entorno de estaciones (física, verde...)</li> <li>* Usuarios y comunidad expuestos al humo en estaciones cercanas a zonas verdes</li> <li>* Fauna presente en las zonas verdes</li> </ul>
<b>Incendios estructurales/ vehiculares</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Servidores, contratistas, usuarios y comunidad en situación de discapacidad y/o movilidad reducida.</li> <li>* Adultos mayores y niños</li> <li>* Personas con antecedentes de problemas respiratorios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Infraestructura abierta que dificulta la contención de los conatos de incendio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Infraestructura externa cercana a estaciones y vías donde pueden extenderse los incendios.</li> <li>* Pasarelas peatonales angostas para la evacuación de Usuarios</li> </ul>
<b>Avenidas torrenciales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Servidores, contratistas, usuarios y comunidad que se encuentran en estaciones y vías aledañas a la quebrada Santa Elena y a nivel del suelo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Pilonas en zonas de alta pendiente cercanas a cuerpos de agua.</li> <li>* Estaciones cercanas a cuerpos de agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Usuarios en estaciones</li> <li>* Infraestructura existente en el entorno de estaciones (física, verde, entre otros)</li> <li>* Menor tiempo de respuesta para evacuación</li> </ul>
<b>Eventos atmosféricos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Servidores, contratistas y usuarios que se encuentran en estaciones y vehículos de pasajeros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Las cabinas presentan mayor susceptibilidad a desplazarse con vientos fuertes y a ser impactados por descargas eléctricas.</li> <li>* Infraestructura abierta que propicia afectación en el interior de las estaciones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Infraestructura abierta que propicia afectación a usuarios</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Esta identificación permitirá definir los riesgos climáticos que aplican a las condiciones de operación de las líneas H y M, con la identificación de los riesgos se deberá realizar su respectiva valoración, de tal forma que se puedan establecer la priorización y con base en esta se procede a la identificación de escenarios críticos.

Se parte de la metodología definida por el Metro de Medellín para la identificación y valoración de riesgos, la cual se desarrolla mediante una matriz que combina la probabilidad de ocurrencia y el impacto de cada escenario de emergencia, de acuerdo con lo establecido en la documentación y procedimientos del área de Administración de Riesgos.

En esta metodología, la probabilidad se entiende como la frecuencia o posibilidad de ocurrencia de un evento, mientras que el impacto corresponde al nivel de afectación que dicho evento puede generar sobre los objetivos institucionales.

Para la presente metodología se adoptó la valoración de riesgos climáticos, incorporando, además, el componente de vulnerabilidad como un factor que influye en la magnitud del impacto. Las tablas que se presentan a continuación resumen las escalas empleadas para la calificación de la probabilidad y el impacto de los riesgos climáticos.

*Ilustración 15. Clasificación probabilidad del riesgo*

<b>Probabilidad</b>	
<b>Muy Alta</b>	Si la amenaza se ha presentado al menos una vez en el último año
<b>Alta</b>	Si la amenaza se ha presentado al menos una vez en los dos últimos años
<b>Media</b>	Si la amenaza se ha presentado al menos una vez en los últimos cinco años
<b>Baja</b>	Si la amenaza se ha presentado una vez en los últimos 25 años
<b>Muy baja</b>	Si la amenaza no se ha presentado en ningún momento

Fuente: Metodología gestión de riesgos, Metro de Medellín

*Ilustración 16. Clasificación del impacto*

<b>Impacto</b>	
<b>No significativo</b>	Impacto menor: localizado y reversible en menos de seis meses
<b>Menor</b>	Impacto menor: localizado y reversible en menos de un año.
<b>Medio</b>	Impacto moderado: localizado y reversible en menos de dos años
<b>Mayor</b>	Contaminación Mayor: Impacto importante: extenso pero reversible en dos años o irreversible y localizado.
<b>Catastrófico</b>	Contaminación irreparable: Impacto catastrófico, extenso e irreversible; efecto permanente en toda la característica y pérdida de viabilidad

Fuente: Identificación, análisis y valoración de riesgos, Metro de Medellín

Con base en lo anterior, se obtiene el nivel del riesgo siguiendo el siguiente mapa de calor propuesto en la metodología de Gestión de Riesgos del Metro de Medellín.

Ilustración 17. Mapa de calor, clasificación del riesgo

		Impacto				
		No significativo	Menor	Medio	Mayor	Catastrófico
Probabilidad	Muy alta	Moderado	Moderado	Alto	Extremo	Extremo
	Alta	Bajo	Moderado	Alto	Extremo	Extremo
	Medía	Bajo	Moderado	Moderado	Alto	Extremo
	Baja	Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Extremo
	Muy baja	Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Extremo

Fuente: Manual de gestión de riegos, Metro de Medellín

El siguiente paso consiste en la definición de los diferentes riesgos climáticos a los que se puede ver expuesta las líneas H y M de cables.

Ilustración 18. Riesgos climáticos líneas H y M.

Riesgo Climáticos Líneas H y M de cables
Debido al incremento en las precipitaciones y fuertes vientos, puede ocasionar inundación de plataformas y estaciones, ocasionando accidentes por piso húmedo o estampidas.
Debido a las altas temperaturas puede ocurrir incendios forestales ocasionando pérdida de biodiversidad
Debido a las altas precipitaciones se incrementa el nivel de la Quebrada Santa Elena, lo que puede ocasionar inundación del patio Miraflores y/o Oriente generando daños en los activos (infraestructura y equipos).
Debido al incremento de frecuencia e intensidad de lluvias se pueden generar caída de árboles o postes de energía, ocasionando daño en los activos y por tanto la interrupción del servicio
Debido a la mala disposición de residuos por parte de la comunidad en la quebrada Santa Elena, puede ocurrir un cambio en el flujo del cauce, lo que puede generar socavación de la infraestructura del patio Miraflores y/o Oriente y estaciones
Debido a la mala disposición de residuos por parte de la comunidad en la quebrada Santa Elena, puede ocurrir una alteración en el flujo del cauce lo que puede generar desbordamiento de la quebrada ocasionando inundación en las instalaciones del patio Miraflores y/o Oriente y estaciones
Debido a la presencia del fenómeno de la niña, se puede presentar movimientos en masa en las zonas con alta pendiente de los cables, ocasionando daño en los activos (infraestructura, equipos).
Debido a la presencia del fenómeno de la niña, se puede presentar saturación de taludes o fallas de contención de la quebrada Santa Elena, ocasionando daño en la infraestructura del patio Miraflores y/o Oriente o el trazado cercano a la quebrada.
Debido a las sequías prolongadas, puede ocurrir escasez del recurso hídrico, ocasionando dificultades en el mantenimiento, aseo y preparación de las cabinas para la prestación del servicio.
Debido a los cambios de patrones de lluvias, puede ocurrir aumento de plagas urbanas (mosquitos, roedores), ocasionando enfermedades en usuarios, gente Metro y comunidad.
Debido al incremento en las precipitaciones y fuertes vientos, puede ocurrir caída de árboles que generen roce con las cabinas, ocasionando la degradación o interrupción del servicio y daños en lo activos.
Debido a los cambios de patrones de lluvias y cambios drásticos en la temperatura, puede presentarse fauna silvestre (alacranes, serpientes, zarigüeyas, sapos, iguanas, entre otras) en las instalaciones de la Empresa, ocasionando dificultades en la prestación del servicio y afectación en la misma fauna.

Riesgo Climáticos Líneas H y M de cables
Debido al incremento en las precipitaciones y fuertes vientos, puede ocasionar inundación de plataformas, estaciones y vías de acceso, ocasionando dificultades en el acceso de pasajeros a la estación, lo que genera demoras en los tiempos de viaje del usuario
Debido al incremento en las precipitaciones y fuertes vientos, puede ocurrir inundación de plataformas, estaciones y vías de acceso, ocasionando daño o pérdida de los activos
Debido a la alta frecuencia de tormentas, el sistema de protección (pararrayos y puntas captadoras) puede superar su capacidad, ocasionando la suspensión temporal del servicio.
Debido a tormentas eléctricas (rayos), se genera suspensión de la operación del cable, lo que genera incremento en los tiempos de viaje de los usuarios
Debido a descargas atmosféricas (rayos), se puede presentar descargas indirectas en los equipos eléctricos y sistemas de control de las estaciones y cabinas de ambos cables, ocasionando suspensión en el servicio.
Debido a los vientos fuertes e intensos, pueden causar oscilación excesiva de los cables y cabinas, ocasionando la suspensión de la operación para evitar descarrilamiento o daños estructurales.
Debido a las altas temperaturas, puede ocurrir el deterioro (corrosión) de los activos (infraestructura y equipos), ocasionando inversiones no planificadas para la Empresa.
Debido al incremento de la frecuencia de las precipitaciones y los fuertes vientos, puede ocurrir deslizamiento de tierra ocasionando dificultades en la movilización de pasajeros en los cables y daños en la infraestructura
Debido a incremento de la intensidad en las precipitaciones generando aumento del nivel de la Quebrada Santa Elena, puede ocurrir inundación de plazoletas de acceso, ocasionando incidentes de salud en los usuarios y la comunidad en general
Debido al incremento en temperaturas máximas puede intensificarse el efecto de isla de calor urbana, ocasionando sobrecalentamiento de equipos y en general la infraestructura, lo que puede ocasionar mayor gasto energético en refrigeración, daños o pérdida de los activos
Debido al incremento en temperaturas máximas puede intensificarse el efecto de isla de calor urbana, ocasionando dificultades a nivel de confort y salud en el personal de la Empresa y los usuarios.
Debido al incremento en temperaturas máximas puede ocurrir incendios forestales ocasionando interrupción de la operación y daño o pérdida de activos.
Debido a incremento del nivel de la Quebrada Santa Elena, puede ocurrir inundación del patio ocasionando daños en la infraestructura y equipos.

Fuente: Elaboración propia

Una vez identificados los riesgos climáticos para las líneas H y M de cables, se aplica la metodología de valoración de riesgos del Metro de Medellín, la cual arroja el siguiente resultado frente a la valoración de los riesgos climáticos identificados para estas líneas. Para este caso, en la tabla se plasman los 7 riesgos climáticos con mayor valoración.

*Ilustración 19. Resultado de valoración de riesgos climáticos Líneas H y M*

Riesgos Climáticos Líneas H y M de cables	Evaluación del riesgo climático
	Nivel de Riesgo
1. Debido a descargas atmosféricas (rayos), se puede presentar descargas indirectas en los equipos eléctricos y sistemas de control de las estaciones y cabinas de ambos cables, ocasionando suspensión en el servicio	Alto
2. Debido a tormentas eléctricas (rayos), se genera suspensión de la operación del cable, lo que genera incremento en los tiempos de viaje de los usuarios	Medio
3. Debido a la alta frecuencia de tormentas, el sistema de protección (pararrayos y puntas captadoras) puede superar su capacidad, ocasionando la suspensión temporal del servicio.	Medio

4. Debido al incremento en las precipitaciones y fuertes vientos, puede ocurrir inundación de plataformas, estaciones y vías de acceso, ocasionando daño o pérdida de los activos	Alto
5. Debido al incremento en temperaturas máximas puede intensificarse el efecto de isla de calor urbana, ocasionando dificultades a nivel de confort y salud en el personal de la Empresa y los usuarios.	Alto
6. Debido a las altas temperaturas, puede ocurrir el deterioro (corrosión) de los activos (infraestructura y equipos), ocasionando inversiones no planificadas para la Empresa	Bajo
7. Debido al incremento de frecuencia e intensidad de lluvias se pueden generar caída de árboles o postes de energía, ocasionando daño en los activos y por tanto la interrupción del servicio	Bajo

Fuente: Elaboración Propia

Para este caso, con la priorización de riesgos climáticos para las líneas H y M de los cables, se enfocará el análisis solamente a los tres (3) riesgos climáticos que tienen una mayor valoración y por tanto mayor potencial de interrumpir la operación de las líneas de cables evaluadas.

### **Definición de activos críticos según riesgos priorizados**

De acuerdo con la definición de los tres riesgos climáticos priorizados, se listan a continuación los activos que son funcionales para la operación y que fallarían en estos escenarios donde se pueda dar la materialización de los riesgos climáticos seleccionados.

Ilustración 20. Activos críticos de acuerdo con el riesgo

Riesgo climático con mayor probabilidad de impacto	Activos críticos	
	Infraestructura	Equipos
Debido a descargas atmosféricas (rayos), se puede presentar descargas indirectas en los equipos eléctricos y sistemas de control de las estaciones y cabinas de ambos cables, ocasionando suspensión en el servicio	Patios, Estaciones, Oficinas, Plazoletas, Pilonas	Paneles solares de las cabinas, Touch panel, UPS, equipos de telemática y recaudo
Debido al incremento en las precipitaciones y fuertes vientos, puede ocurrir inundación de plataformas, estaciones y vías de acceso, ocasionando daño o pérdida de los activos	Patios, Estaciones, Oficinas, Plazoletas, Pilonas	Paneles solares de las cabinas, Touch panel, UPS, equipos de telemática y recaudo
Debido al incremento en temperaturas máximas puede intensificarse el efecto de isla de calor urbana, ocasionando dificultades a nivel de confort y salud en el personal de la Empresa y los usuarios.	Estaciones, cabinas, patios, oficinas, talleres	Paneles solares de las cabinas, Touch panel, UPS, equipos de telemática y recaudo

Fuente: Elaboración Propia

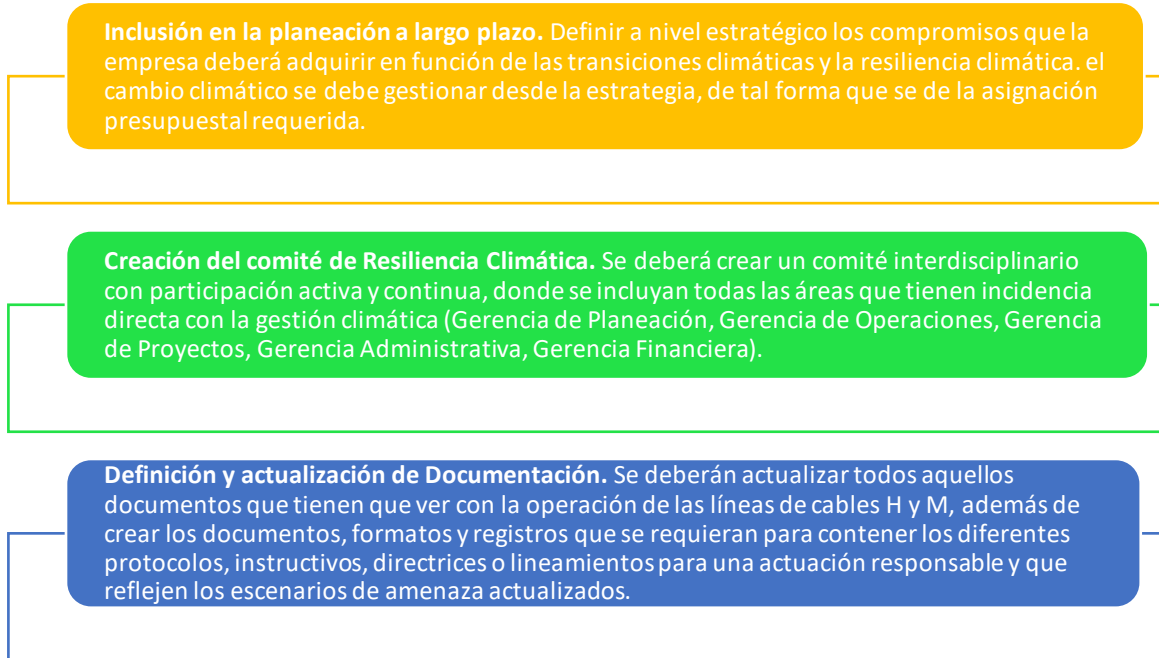
### Fase 7: Análisis y definición del paso a paso de la resiliencia climática

El punto de partida para definir la resiliencia climática en el sistema de transporte masivo, líneas H y M, es tener un estado de gestión de riesgos activo y en constante alerta frente a la variabilidad y el cambio climático. Para que la operación de las líneas H y M sean resilientes al clima, se debe contar con un plan sistémico, de acción progresiva y continua, que se enfoque en la medición de capacidades y en la implementación o ejecución de acciones de adaptación.

Con el fin de desarrollar un paso a paso específico, pero a la vez práctico, de cómo la operación de las líneas H y M del sistema pueden ser resilientes al clima, a continuación, se presenta cada uno de estos.

#### Definición de la Gobernanza y Compromiso Estratégico

Ilustración 21. Definición de la Gobernanza y el compromiso estratégico

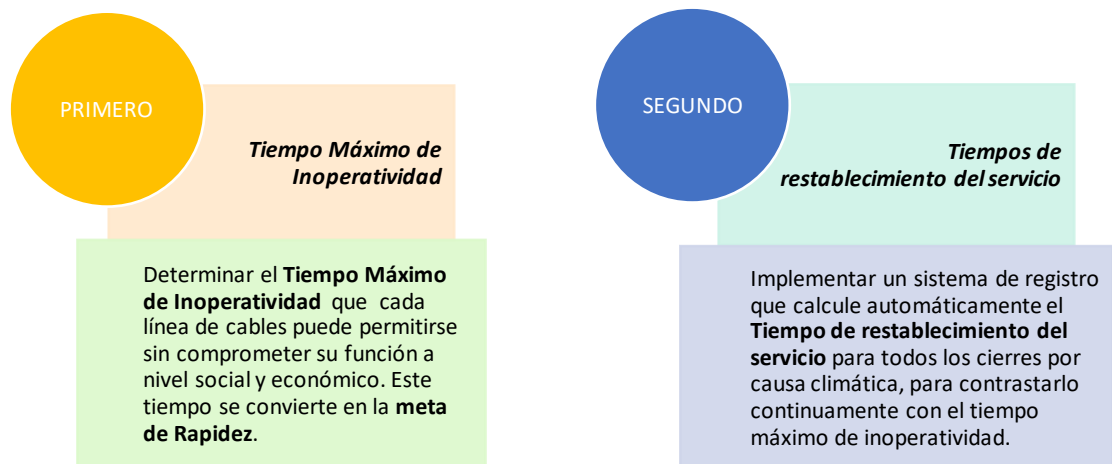


Fuente: Elaboración propia, con apoyo de la IA

Establecer la métrica de Resiliencia climática

El propósito de la resiliencia no es solo evitar la falla, sino que se debe establecer qué tan rápido se puede recuperar el sistema de un evento materializado, para este caso se deberá definir la métrica “tiempos de restablecimiento del servicio”, de tal forma que las diferentes acciones que se implementen como mejoras en los protocolos y lineamientos a nivel operacional, permitan que estos tiempos sean cada vez menores.

Ilustración 22. Métrica de la resiliencia climática



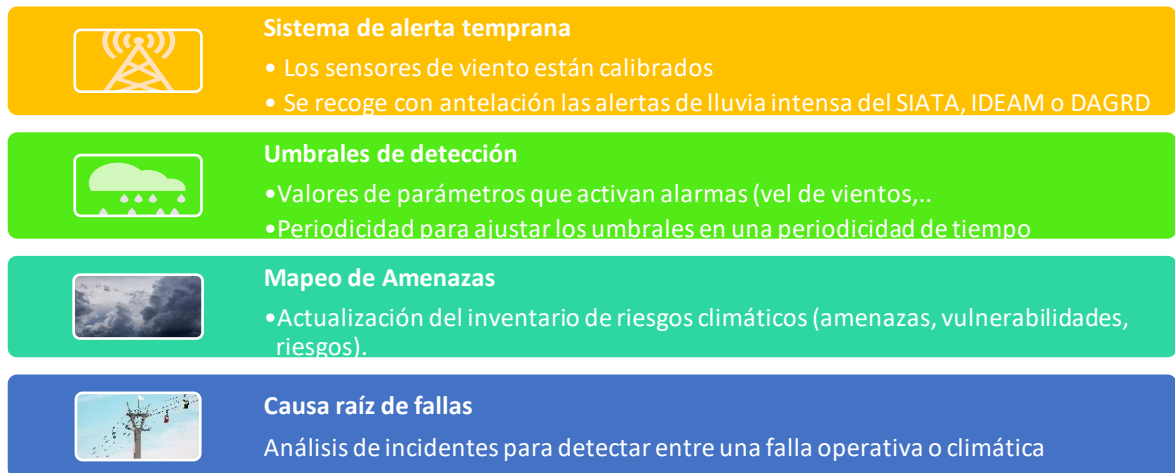
Fuente: Elaboración propia, con apoyo de la IA

### Enfoque sistémico de las cuatro capacidades

En este enfoque las líneas H y M de cables deben tener presente la evaluación secuencial de las cuatro (4) capacidades de la resiliencia climática.

**Capacidad de Anticipación:** El sistema de cables (H y M) deben contar con la capacidad para prever y comprender sus riesgos climáticos que se avecinan, antes de que sucedan.

*Ilustración 23. Capacidad de anticipación*



Fuente: Elaboración propia, con apoyo de la IA

**Capacidad de preparación:** El sistema de cables (H y M) deben contar con los recursos fijos y los planes necesarios para reducir la vulnerabilidad antes de la ocurrencia de un evento.

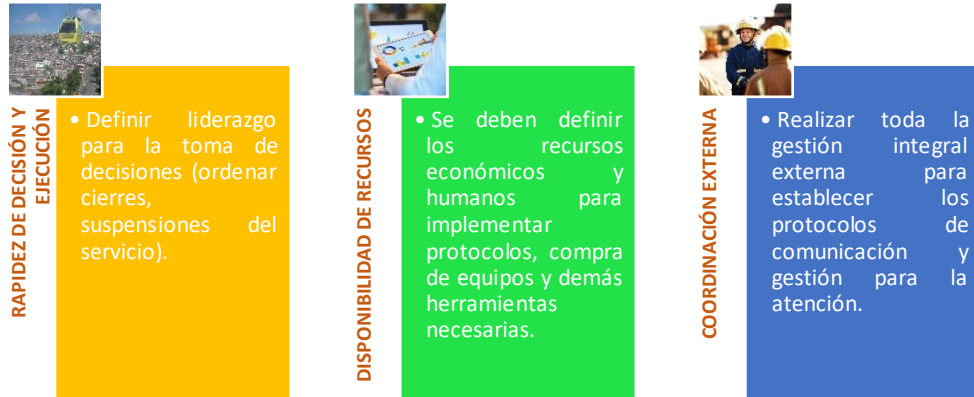
Ilustración 24. Capacidad de preparación



Fuente: Elaboración propia, con apoyo de la IA

**Capacidad de respuesta:** El sistema de cables (H y M) debe enfocarse en la ejecución de protocolos con rapidez y la implementación efectiva de los recursos durante el evento.

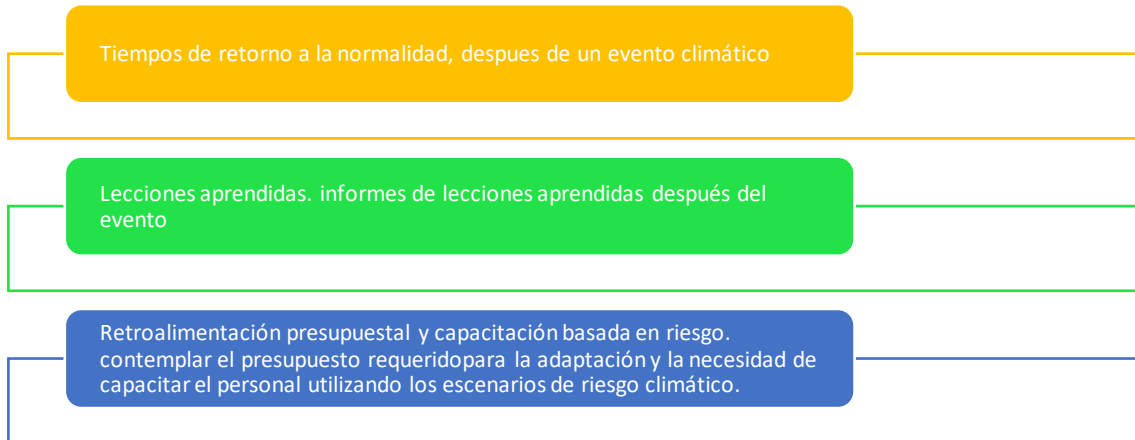
Ilustración 25. Capacidad de respuesta



Fuente: Elaboración propia, con apoyo de la IA

**Capacidad de Recuperación y Adaptación:** Esta capacidad hace referencia al aprendizaje, transformando las experiencias negativas en mejoras de preparación y anticipación, garantizando la operación del sistema y su sostenibilidad.

Ilustración 26. Capacidad de adaptación y recuperación



Fuente: Elaboración propia, con apoyo de la IA

## RESULTADOS

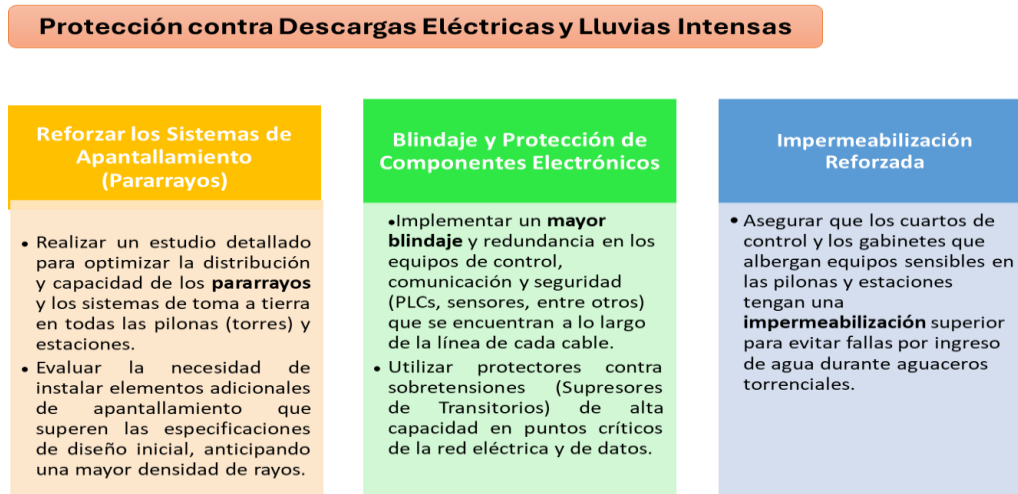
## Fase 8: Interpretación y reporte de resultados enfocado a la resiliencia climática del sistema (líneas H y M).

Dentro de esta última fase de la metodología de resiliencia climática, se define finalmente que, la resiliencia no es opción, es una necesidad estratégica y fundamental para cualquier Empresa en el entorno actual. La preparación para la resiliencia climática transforma una amenaza en una oportunidad, de tal forma que la Empresa sea más eficiente, atractiva para inversores, relevante y querida por la sociedad.

Para esta fase se definirán una serie de actividades, acciones, estrategias y proyectos que podrían direccionar a la Empresa de Transporte Masivo Metro para implementar frente a la adaptación, mitigación y finalmente en la resiliencia climática bajo las condiciones del Valle de Aburrá y las necesidades operacionales del Metro en cuanto a sus líneas H y M.

Para mejorar las condiciones de resiliencia de la operación de las Líneas H y M, en esta metodología nos centraremos en definir acciones en tres puntos claves: protección de equipos, estabilidad del terreno y gestión del viento.

*Ilustración 27. Protección descargas eléctricas y lluvias intensas*



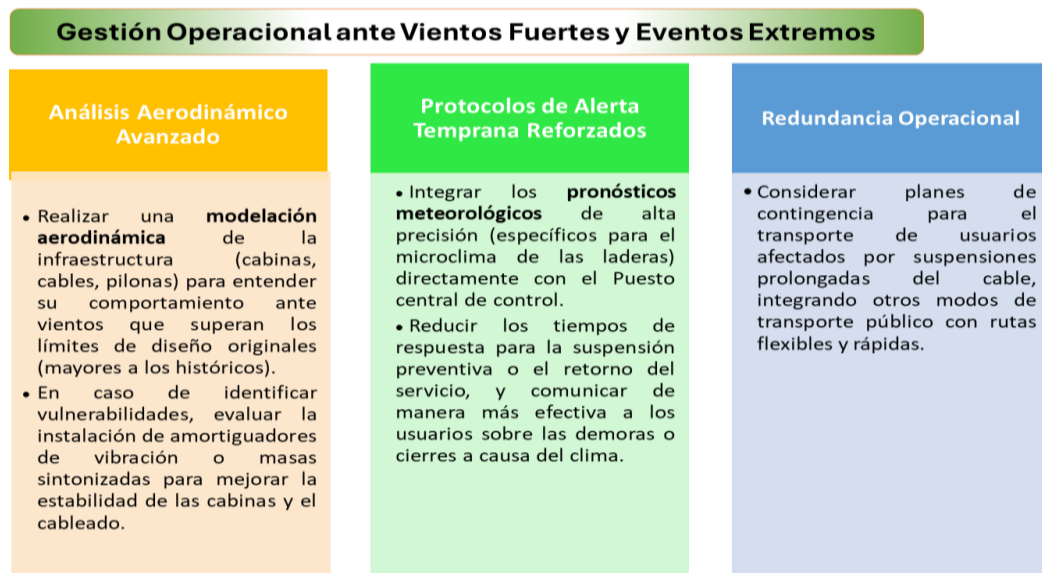
Fuente: Elaboración propia, con apoyo de la IA

Ilustración 28. Estabilización de la infraestructura y el terreno



Fuente: Elaboración propia, con apoyo de la IA

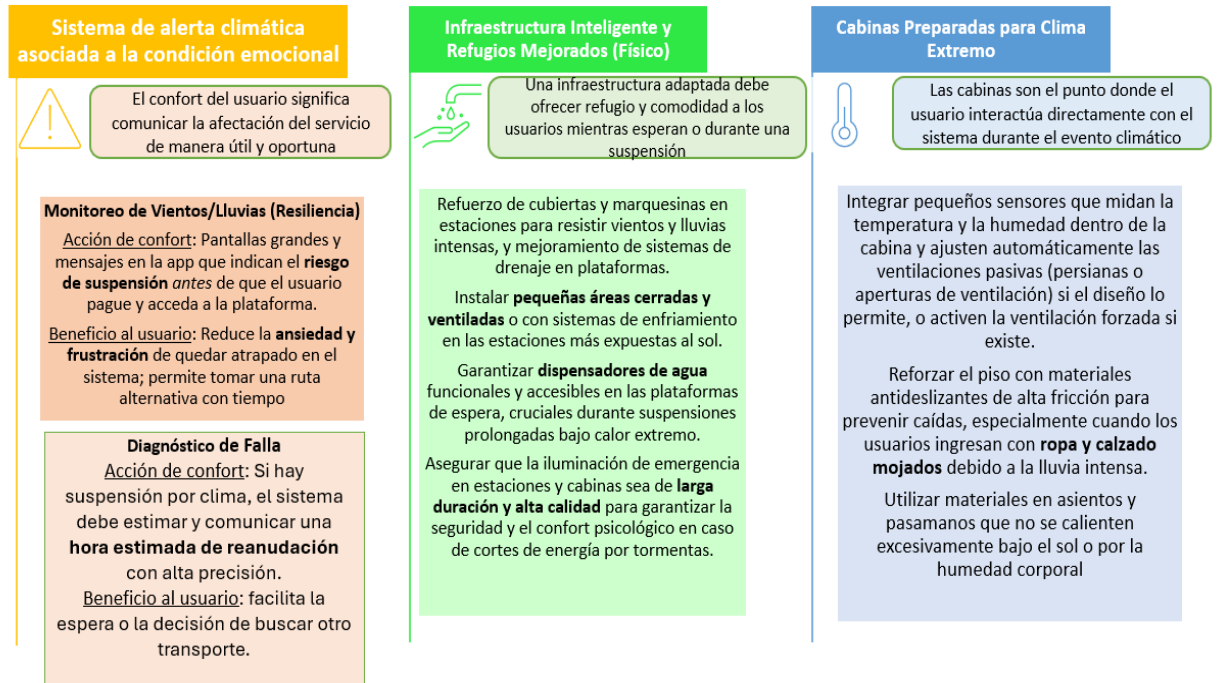
Ilustración 29. Gestión operacional ante vientos fuertes y eventos extremos



Fuente: Elaboración propia, con apoyo de la IA

Ahora bien, se definieron diferentes acciones y estrategias para la resiliencia frente a la infraestructura, para el terreno y para las condiciones de viento, es necesario entonces, definir las diferentes acciones que vayan encaminadas a mejorar la experiencia del usuario y el confort de los empleados Metro.

Ilustración 30. Acciones y estrategias para la resiliencia climática



Fuente: Elaboración propia con apoyo de la IA Gemini

## DISCUSIÓN

Tomando como punto de partida los objetivos establecidos inicialmente, podemos establecer claramente que se estructuró una metodología de resiliencia que permitirá a la Empresa Metro definir e integrar los diferentes conceptos asociados al cambio climático y a la resiliencia, además de las necesidades latentes que hoy presenta el territorio, y por ende, la operación de sus líneas H y M. El desarrollo de esta metodología permitió generar una estructura capaz de tomar las condiciones reales y actuales de la ciudad de Medellín frente a las condiciones del clima, de la hidrografía y del suelo, permitiendo así establecer las amenazas y las vulnerabilidades que hoy presenta la ciudad y por tanto el sistema de cables de las líneas H y M. con base en estas condiciones se definieron los diferentes riesgos climáticos que fueron el punto de partida para establecer realmente las condiciones en que se encuentra expuestos estos cables por las condiciones climáticas y de esta forma, poder establecer una metodología con un paso a paso claro para poder ser resilientes al clima.

Finalmente, podemos establecer que esta metodología puede expandirse por todas las líneas de la Empresa Metro sin embargo, como se plantea en el mismo desarrollo metodológico, la resiliencia climática debe ser de constante actualización, revisión, monitoreo y seguimiento, así como la expansión de las diferentes capacidades mediante un análisis costo – beneficio.

## PLAN DE ACCIÓN

Para este trabajo de grado el plan de acción consiste en la implementación de la metodología de resiliencia climática para las líneas H y M de los cables. Se tomará como referencia lo establecido en cada una de las fases, entendiendo que el punto de partida serán los elementos de contexto del entorno, identificación de amenazas, vulnerabilidades y riesgos climáticos.

*Ilustración 31. Plan de Acción metodología resiliencia climática*

<b>Plan de Acción Metodología de Resiliencia Climática Líneas H y M</b>	
<b>¿Qué?</b>	<b>¿Cómo?</b>
<b>1. Definición de la idea a implementar, en este caso es similar al objetivo que se quiera trazar o a donde se quiera llegar.</b>	Se parte de las condiciones actuales de vulnerabilidad que hoy presenta el sistema Metro con sus líneas H y M y las condiciones locales frente al entorno y la influencia del clima en dicha operación. Adicionalmente, es un tema planetario al que estamos llamados a solucionar y controlar desde las entidades
<b>2. Se define la estrategia de recolección de información, las fuentes, las entidades y el tipo de información requerida para el desarrollo de la metodología</b>	Se identifican la información requerida y el mecanismo de obtención (documentos, entrevistas, páginas oficiales, entre otras), se establece el tipo de información, los informantes y las entidades que permitan la obtención de la información.
<b>3. Se establece el análisis y la secuencia lógica de la definición de elementos que permitan darle inicio a la metodología establecida</b>	Una vez establecida la forma de obtener la información, se procede a definir la información requerida, amenazas, vulnerabilidades, impacto generado, riesgos, metodología de evaluación de riesgos climáticos, para establecer los riesgos con mayor valoración y con base en estos, se define la resiliencia climática para el sistema.
<b>4. En este paso del plan de acción se debe establecer los elementos que permitan establecer la resiliencia climática para las dos líneas de transporte establecidas (Líneas H y M)</b>	Los elementos a desarrollar consisten básicamente la definición de la gobernanza y el compromiso estratégico, se establece la métrica de la resiliencia climática, el enfoque sistémico de las cuatro capacidades (anticipación, preparación, capacidad de respuesta, recuperación y adaptación).
<b>5. como último punto del plan de acción, se definen las estrategias, acciones, actividades o proyectos que permitan desarrollar la capacidad de resiliencia.</b>	En esta última fase o punto del plan de acción, el llamado es a la implementación de las acciones definidas en tres puntos claves: protección de equipos, estabilidad del terreno y gestión del viento, adicionalmente en las condiciones de confort para los grupos de interés usuarios y colaboradores.

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la definición de responsabilidades, plazos y recursos, en el desarrollo metodológico se establece la necesidad de crear un comité de resiliencia climática y la definición de los recursos humanos y económicos para la implementación de la metodología. Respecto a la definición de plazos, en el apartado relacionado con la Gobernanza y la planificación estratégica, se define la prioridad que deberá tener la implementación del tema para la organización.

El plan de acción también contempla el plan comunicacional que permita identificar el involucramiento del personal, los roles, plazos y como su trabajo contribuye al objetivo general. Finalmente, se contempla el monitoreo y ajuste a través del seguimiento continuo al progreso de la implementación de la metodología, la identificación de las lecciones aprendidas y el ajuste y la retroalimentación del plan.

Como parte del desarrollo de este trabajo, se define la estructura mínima para el plan de acción.

*Ilustración 32. Estructura del Plan de Acción*

Elemento	Descripción
Objetivo General	Que contemple la implementación de la metodología de resiliencia climática
Actividad	Nombre específico de la acción a realizar
Responsable	La persona o equipo a cargo
Plazo	Fecha de finalización prevista
Recursos	Presupuesto, equipo o herramienta necesaria
Indicador (Métrica)	Como se medirá el cumplimiento
Estado actual	Pendiente, en progreso, completado

Fuente: Elaboración propia con apoyo de la IA Gemini

# INFOGRAFICO

A continuación, se presenta el infográfico del presente trabajo de maestría el cual se puede revisar con mayor detalle en el Anexo 04.

Ilustración 33. Infográfico resiliencia climática

## Resiliencia climática para el sistema de transporte masivo del Valle de Aburrá Caso de estudio Líneas H y M

### Pregunta de investigación

¿Cuáles son las medidas de prevención de riesgos que deben establecerse en razón a las vulnerabilidades del sistema de transporte frente a amenazas de eventos climáticos extremos?

DICIEMBRE DE 2025

#### AUTORES

PAOLA ANDREA POSADA LONDOÑO  
MARLY ANDREA LÓPEZ MUÑOZ

#### DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

CARLOS FERNANDO CADAVID  
RESTREPO



#### Revisión de literatura

La resiliencia climática es una cuestión derivada del entendimiento que las estrategias +1.5oC y cero neto no se alcanzarán efectivamente. Es una cuestión que evoluciona más allá de los mecanismos de mitigación y adaptación, en el entendimiento de la emergencia por prevenir riesgos climáticos y transformar de modo contundente los sistemas socioecológicos. En todos los ámbitos, es una estrategia en construcción y de ninguna manera puede decirse que se ha implementado satisfactoriamente como hecho concluido. (US Resilience Tool Kit, 2024)

Se ha revisado el estado del arte sobre resiliencia urbana y sistemas de transporte urbano en otras ciudades (Ribeiro & Gonçalves, 2019) (Wang et al., 2020), teorías de gobernanza climática (Aylett, 2015) y adicionalmente Cunderby et al., 2024 plantean que antes de abordar temas de resiliencia climática se deben abordar primero las necesidades básicas en términos de seguridad vial y salud.

La literatura consultada a nivel local incluye revisiones sobre resiliencia climática enfocada en diagnósticos frente a temas de adaptación y variabilidad climática (Ainsour et al., 2024) por otro lado, también se referencia de algunos proyectos urbanos ejecutados para este objetivo a nivel de ciudad en transporte (Prihantanto et al., 2023), (Chirisa et al., 2023), sin embargo se identifica una brecha frente a condiciones de resiliencia climática a nivel de territorio y específicamente a nivel de sistemas de transporte masivo para el Valle de Aburrá, (Ferranti et al., 2022), (Herrera & MacAskill, 2021).

#### Propuesta metodologica

Se estudiará la preparación del Sistema de Transporte masivo del Valle de Aburrá, la implementación de mecanismos de reconocimiento de vulnerabilidades frente a amenazas climáticas extremas para contribuir a la reducción de eventos de desastres a nivel metropolitano.

Este estudio se realizará en Antioquia en el Valle de Aburrá, Los datos se recolectaran por medio de análisis de fuentes de información primaria y secundaria, entrevistas a actores claves, Observación directa sobre el sistema, datos climáticos, históricos del SIATA, Análisis de interrupciones de los cables por condiciones meteorológicas.

Análisis de datos: Contrastar y correlacionar información primaria y secundaria de diferentes variables y lectura de mapas.

#### Recursos requeridos y gestión de estos

- Google forms para encuestas
- ArcGis para análisis de mapas
- Grabadora de voz y aplicación con IA para transcribir las entrevistas
- Repositorio de información para almacenar la información recolectada y levantada.

#### Limitaciones del estudio

- Disponibilidad de la información en los tiempos establecidos para el estudio.
- Permisos para la divulgación de la información de las diferentes empresas/entidades de transporte.
- Complejidad de información
- Confidencialidad de actores relevantes de las instituciones del estado

#### Resultados esperados

Aproximación de la metodología de resiliencia climática para sistemas de transporte masivo y como caso de estudio las Líneas de cable H y M.

#### Impacto del trabajo

En primera instancia al sistema de transporte y tomadores de decisiones, a las empresas que tienen sistemas de transporte masivo en el Valle de Aburrá y que pueda ser una herramienta referente para otras empresas regionales, nacionales e internacionales.  
A la sociedad mediante el mejoramiento de la respuesta ante emergencias.  
La implementación de este libro contribuirá notoriamente en las medidas de prevención de riesgos en razón a las vulnerabilidades del sistema de transporte masivo frente a las amenazas de eventos climáticos, en otras palabras, cómo fortalecerse la resiliencia climática del sistema.



#### Consideraciones éticas

- Confidencialidad de información
- Derechos de autor
- Uso adecuado Inteligencia artificial
- Consentimiento informado
- Privacidad
- Anonimato
- Contextualización normativa o regulatoria

#### Referencias

[1] B. Thompson, M. M., & Anderson, S. G. (2023). The built environment's role in climate change: Causes, consequences, and solutions for better research. *Journal of Urban and Environmental Research*, 10, 100000.

[2] Ribeiro, S., & Gonçalves, J. (2019). Beyond urban climate change: vulnerability of the transport system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 70, 100000.

[3] Wang, Y., & Wang, J. (2020). Urban climate resilience: A conceptual framework. *Journal of Urban and Environmental Research*, 10, 100000.

[4] Aylett, J. (2015). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[5] Cunderby, J., & Cunderby, J. (2024). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[6] Prihantanto, A., & Prihantanto, A. (2023). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[7] Chirisa, S., & Chirisa, S. (2023). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[8] Ferranti, E., & MacAskill, I. (2022). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[9] Herrera, J., & MacAskill, I. (2021). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[10] Posada, P., & López, M. (2025). *Resiliencia climática para el sistema de transporte masivo del Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad de Medellín.

[11] Cadavid, C. (2025). *Resiliencia climática para el sistema de transporte masivo del Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad de Medellín.

[12] US Resilience Tool Kit. (2024). *US Resilience Tool Kit*. Washington, DC: US Resilience Tool Kit.

[13] Ainsour, J., & Ainsour, J. (2024). *Resiliencia climática para el sistema de transporte masivo del Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad de Medellín.

[14] Wang, Y., & Wang, J. (2020). *Urban climate resilience: A conceptual framework*. London: Routledge.

[15] Aylett, J. (2015). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[16] Cunderby, J., & Cunderby, J. (2024). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[17] Prihantanto, A., & Prihantanto, A. (2023). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[18] Chirisa, S., & Chirisa, S. (2023). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[19] Ferranti, E., & MacAskill, I. (2022). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[20] Herrera, J., & MacAskill, I. (2021). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[21] Posada, P., & López, M. (2025). *Resiliencia climática para el sistema de transporte masivo del Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad de Medellín.

[22] Cadavid, C. (2025). *Resiliencia climática para el sistema de transporte masivo del Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad de Medellín.

[23] US Resilience Tool Kit. (2024). *US Resilience Tool Kit*. Washington, DC: US Resilience Tool Kit.

[24] Ainsour, J., & Ainsour, J. (2024). *Resiliencia climática para el sistema de transporte masivo del Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad de Medellín.

[25] Wang, Y., & Wang, J. (2020). *Urban climate resilience: A conceptual framework*. London: Routledge.

[26] Aylett, J. (2015). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[27] Cunderby, J., & Cunderby, J. (2024). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[28] Prihantanto, A., & Prihantanto, A. (2023). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[29] Chirisa, S., & Chirisa, S. (2023). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[30] Ferranti, E., & MacAskill, I. (2022). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[31] Herrera, J., & MacAskill, I. (2021). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[32] Posada, P., & López, M. (2025). *Resiliencia climática para el sistema de transporte masivo del Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad de Medellín.

[33] Cadavid, C. (2025). *Resiliencia climática para el sistema de transporte masivo del Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad de Medellín.

[34] US Resilience Tool Kit. (2024). *US Resilience Tool Kit*. Washington, DC: US Resilience Tool Kit.

[35] Ainsour, J., & Ainsour, J. (2024). *Resiliencia climática para el sistema de transporte masivo del Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad de Medellín.

[36] Wang, Y., & Wang, J. (2020). *Urban climate resilience: A conceptual framework*. London: Routledge.

[37] Aylett, J. (2015). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[38] Cunderby, J., & Cunderby, J. (2024). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[39] Prihantanto, A., & Prihantanto, A. (2023). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[40] Chirisa, S., & Chirisa, S. (2023). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

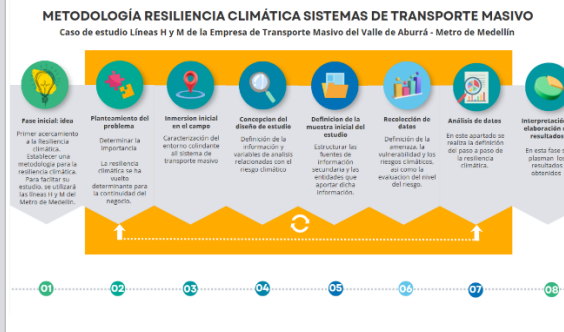
[41] Ferranti, E., & MacAskill, I. (2022). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[42] Herrera, J., & MacAskill, I. (2021). *Urban Climate Resilience: A Conceptual Framework*. London: Routledge.

[43] Posada, P., & López, M. (2025). *Resiliencia climática para el sistema de transporte masivo del Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad de Medellín.

[44] Cadavid, C. (2025). *Resiliencia climática para el sistema de transporte masivo del Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad de Medellín.

[45] US Resilience Tool Kit. (2024). *US Resilience Tool Kit*. Washington, DC: US Resilience Tool Kit.



## CONCLUSIONES

La metodología de resiliencia climática debe tener un enfoque sistémico, donde hay conexión con otros sistemas complejos y se interrelacionan diferentes variables, lo que exige análisis más complejos para relacionar las interdependencias.

Las condiciones climáticas (lluvia intensa, calor, viento) que rigen el Valle de Aburrá, específicamente para la ciudad de Medellín, ya no son eventos excepcionales, sino factores sistémicos que afectan la operación diaria del sistema de transporte masivo. La preparación continua para la resiliencia climática es fundamental para la seguridad del sistema y sus diferentes grupos de interés.

La necesidad de interacciones continuas con otras entidades se vuelve una prioridad, la capacidad de anticiparse y actuar preventivamente es el pilar de la resiliencia climática, se debe pasar de una acción reactiva a una acción preventiva, contando con un sistema integrados de alerta temprana.

Se determinó la importancia de que los sistemas de transporte masivo cuenten con estudios, líneas, bases con el objetivo de extraer información que ayude a identificar, amenazas, vulnerabilidades, elementos expuestos y posibles riesgos que generan los sistemas de transporte con su operación o bien, aquellos riesgos que el sistema recibe de manera exógena (natural, tecnológica, antrópica, entre otros).

La aplicabilidad de la metodología puede verse limitada por la disponibilidad de la información de consulta tanto a nivel de línea operativa, así como la disponibilidad de información de entes territoriales sobre el entorno y sobre el cambio y la variabilidad climática.

La resiliencia climática debe considerarse en todo el ciclo de vida de la infraestructura (planificación, diseño, construcción, operación, repotenciación), esto facilitará la adaptación y fortalecerá las capacidades (Anticipación, preparación, respuesta y recuperación).

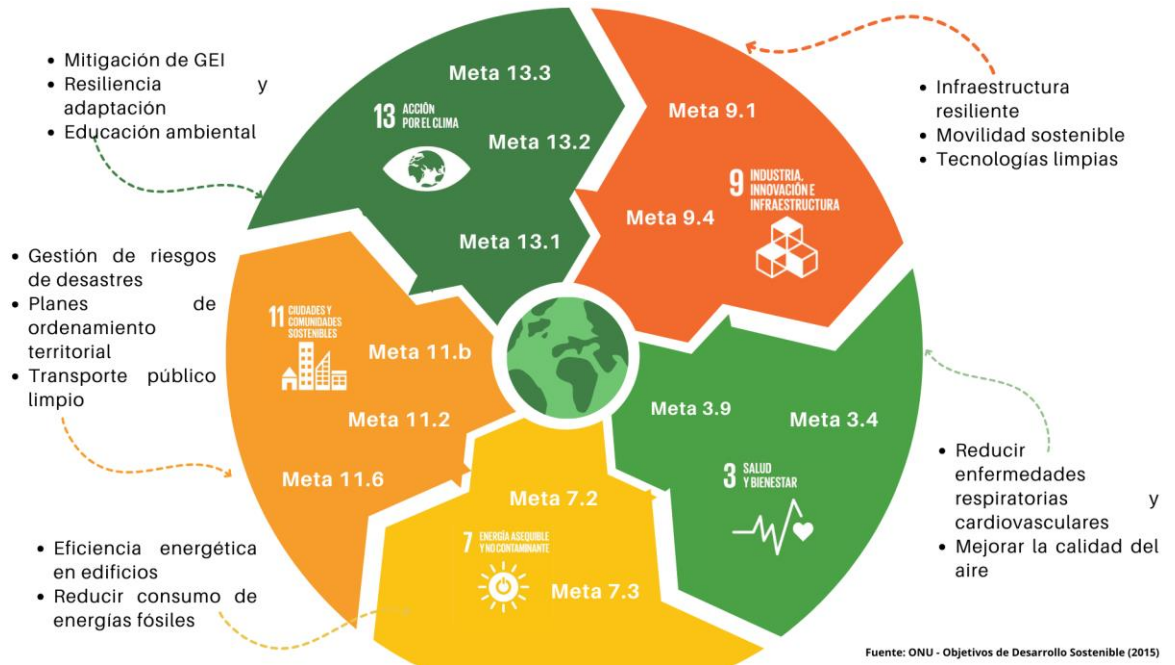
Si bien se plantea una aproximación a una metodología para la resiliencia climática, en el proceso de desarrollo se identificaron aspectos a fortalecer asociados con la evaluación y adaptación a la infraestructura.

De acuerdo con la metodología del Retorno Social de la Inversión -SROI- se ha obtenido para el proyecto "Metodología de resiliencia climática para los sistemas de transporte masivo y la implementación como caso de estudio en las líneas de cable

H y M del Metro de Medellín." por cada peso invertido, se genera 5,33 pesos valor social. El Valor de los beneficios sociales es significativamente mayor que el costo de la Inversión.

## APORTE A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

A continuación, se plasma la alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible con su respectiva meta e indicador al que este trabajo de grado le aporta. Para Ampliar la información, remitirse al Anexo 06.



## **IMPACTO DEL TRABAJO AL DESARROLLO SOSTENIBLE**

El propósito principal del análisis SROI en el contexto de la definición metodología de Resiliencia climática para los sistemas de transporte masivo Líneas H y M permite definir los costos evitados a la empresa Metro de Medellín que están asociados a la contratación de una consultoría, adicionalmente también se contempla como un costo evitado para el gremio o sector transporte.

De acuerdo con la metodología del Retorno Social de la Inversión -SROI- se ha obtenido para el proyecto "Metodología de resiliencia climática para los sistemas de transporte masivo y la implementación como caso de estudio en las líneas de cable H y M del Metro de Medellín." por cada peso invertido, se genera 5,33 pesos valor social. El Valor de los beneficios sociales es significativamente mayor que el costo de la Inversión, para más detalle, remitirse al Anexo 05.

## BIOGRAFIAS

### Marly Andrea López Muñetón (autora)

Ingeniera Ambiental, Especialista en Gerencia de Proyectos  
Candidata a Maestría en Sostenibilidad  
Empresa Metro de Medellín- Gerencia de Proyectos de Infraestructura

Su experiencia profesional se ha enfocado en la caracterización ambiental de corredores urbanos de movilidad priorizados por la Empresa Metro de Medellín con instrumentos de planificación territorial. Se desarrolló como residente ambiental en la obra civil de la Ampliación de patios y talleres de la empresa Metro de Medellín y posteriormente como supervisora del componente ambiental en el segundo proyecto de movilidad más grande de la ciudad de Medellín, el Metro de la 80.

### Paola Andrea Posada Londoño (autora):

Ingeniera Sanitaria, Especialista en Legislación Ambiental  
Candidata a Maestría en Sostenibilidad  
Metro de Medellín, Gerencia de Planeación

Profesional en Sostenibilidad del Metro de Medellín, con una trayectoria en temas de sostenibilidad ambiental, auditora en ISO14001, Consultora en estudios de prefactibilidad y factibilidad para cables aéreos, lineamientos de política de gestión ambiental, social y de cultura ciudadana en torno a la movilidad en sistemas de transporte público, participación en la planificación y ejecución de los diferentes sistemas de transporte, extensión de metro, cables aéreos y tranvía. Estructuración de metro de la 80, definición e implementación del modelo de sostenibilidad del Metro de Medellín. Representante en el tema de adaptación y mitigación al cambio climático de la Empresa.

### Carlos Fernando Cadavid (director):

Ingeniero Químico, Especialista en Ingeniería Ambiental y Gerencia del Ambiente  
Magíster en Ecoauditorías y Planificación empresarial del Medio Ambiente.

Director de Urban Lab Mde desde el 2020, fue director de proyectos en el Centro Nacional de Producción más Limpia y tecnologías ambientales desde 1998 a 2019. Ha sido director del estudio de externalidades ambientales, indicadores de sostenibilidad y gestión de la sostenibilidad corporativa bajo criterios ASG para la Empresa Metro de Medellín.

## AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS

Queremos agradecer al Metro de Medellín, por abrirnos las puertas, compartir su experiencia y permitirnos comprender de primera mano aquellos retos y esfuerzos que implica la transición a un sistema de transporte más resiliente y sostenible. Su compromiso con la ciudad y el bienestar de los usuarios nos mantuvo motivadas durante todo el proceso. A nuestro director de tesis por guiarnos, sus aportes y orientaciones fueron fundamentales para el desarrollo de esta metodología. A la universidad EAFIT y sus profesores quienes con su inmenso conocimiento y experiencia nos transmitieron una mirada sistémica para abordar este trabajo de grado. Reconocemos la paciencia y apoyo incondicional de nuestros familiares y amigos, así como el de nuestros compañeros de maestría que estuvieron allí soportando el equipo. Finalmente, nuestra dedicatoria es para todas aquellas personas que cada día trabajamos por un territorio más sostenible, por generar valor y bienestar a los seres humanos.

## REFERENCIAS

- Al-Humaiqani, M. M., & Al-Ghamdi, S. G. (2022). The built environment resilience qualities to climate change impact: Concepts, frameworks, and directions for future research. In *Sustainable Cities and Society* (Vol. 80). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103797>
- AMVA, & EAFIT. (2019). *Plan de Acción ante el Cambio y la Variabilidad Climática del Área Metropolitana del Valle de Aburrá*.
- Cañavera Herrera, J. S., & MacAskill, K. (2021). Navigating institutional complexity for the adaptation of urban transport infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103073>
- Cardoso, M. M. (2019). *Study of vulnerability and resilience in the city of Santa Fe, Argentina: The role of urban services in general and urban transport in particular*.
- Cooperación Técnica Alemana. (2010). *Adaptación del Transporte Urbano al Cambio Climático*. <http://www.sutp.org>
- Crespo García, L., & Arroyo, F. J. (2020). *Metodología de análisis de adaptación al cambio climático de infraestructuras de transporte Climate-Change-Adaptation Analysis Methodology of Transport Infrastructures*.
- Departamento Nacional de Planeación. (2011). *Conpes 3700*.
- Germanwatch. (2025). *06-07-2025 Climate Risk Index 2025*.
- IPCC. (2018). Framing and Context. In *Global Warming of 1.5°C* (pp. 49–92). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.003>

- Markolf, S. A., Hoehne, C., Fraser, A., Chester, M. V., & Underwood, B. S. (2019). Transportation resilience to climate change and extreme weather events – Beyond risk and robustness. *Transport Policy*, 74, 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.11.003>
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Orientaciones generales para las autoridades ambientales urbanas y corporaciones autonomas regionales y de Desarrollo Sostenible en la gestion del Riesgo y Desastres en el marco de sus competencias.*
- Murillo Pérez, L. M., Varela, M. I., Restrepo Marta Luz, Castrillon, D. A., Vasco, G. J., Rodriguez, J. C., Alvis, C. A., Salazar, J. F., Bohorquez, C. A., Arcila, N., Álvarez, C. I., Jimenez, H. D., & Muñoz Upegui, C. (2024). *Recomendaciones de Acciones para la Resiliencia y la Sostenibilidad Medellín.* <https://urbanresiliencehub.org/actions-for-resilience/medellin/>
- Naciones Unidas. (1992). *CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO.*
- Naciones Unidas. (2016). *Acuerdo de París.*
- Rojas Morales, J. R. (2024). La era de la ebullición global: Desafíos y oportunidades para la resiliencia climática en la región centroamericana. *Revista de Ciencias Ambientales*, 58(2), 1–20. <https://doi.org/10.15359/rca.58-2.9>
- Surico, J. (2020). *Creating Resilient Transport in Latin America: Risks, Adaptations, and Limitations.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24399.51364>
- United Nations Environment Programme. (2024). *Sectoral Risk Briefings: Insights for Financial Institutions.*
- Uribe Rueda, N. (2022). *Descarbonización y Acción Climática.*
- Vargas, C., Gomez-Valencia, M., Gonzalez-Perez, M. A., Cordova, M., Calixto Casnici, C. V., Monje-Cueto, F., Nava-Aguirre, K. M., Minto-Coy, I., & Coronado,

F. (2022). Climate-resilient and regenerative futures for Latin America and the Caribbean. *Futures*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.103014>

Wang, T., Qu, Z., Yang, Z., Nichol, T., Clarke, G., & Ge, Y. E. (2020). Climate change research on transportation systems: Climate risks, adaptation and planning. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102553>

## ANEXOS

1. Esquema de metodología de resiliencia climática
2. Caracterización de las líneas H y M
3. Código de suspensiones Línea H y M 2024-2025 (requiere visualizador de código).
4. Infográfico resiliencia climática
5. Aporte a la Sostenibilidad (Cálculo SROI)
6. Aporte a los Objetivos de Desarrollo Sostenible
7. Plan de divulgación partes interesadas.
8. Plan de Acción para la resiliencia climática de la Empresa Metro