



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Consideraciones para la adaptación de la infraestructura ferroviaria al cambio climático

Luz Angélica Gradilla Hernández
Juan Fernando Mendoza Sánchez
José Belisario Aburto Barrera

Publicación Técnica No. 784
Querétaro, México
2024

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la División de Transporte Sostenible y Cambio Climático del Instituto Mexicano del Transporte, por la Dra. Luz Angélica Gradilla Hernández, por el Mtro. Juan Fernando Mendoza Sánchez, Jefe de la División de Laboratorios de Infraestructura de Vías Terrestres, y por el Ing. José Belisario Aburto Barrera, ambos de la Coordinación de Infraestructura de Vías Terrestres.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna MI-10/23 "Consideraciones para la adaptación de la infraestructura ferroviaria al cambio climático".

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Instituto Mexicano del Transporte.

Tabla de Contenido

	Página
Sinopsis.....	v
Abstract.....	vii
Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	5
1.1 Elementos de la infraestructura ferroviaria.....	6
1.2 Sistema Ferroviario Mexicano.....	8
2. Principales impactos del cambio climático en la infraestructura ferroviaria.....	11
2.1 Impactos del cambio climático y el clima extremo en la infraestructura ferroviaria.....	12
2.1.1 Impactos por altas temperaturas.....	12
2.1.2 Impactos por bajas temperaturas.....	14
2.1.3 Impactos por precipitación intensa.....	14
2.1.4 Impactos por sequía.....	16
2.1.5 Impactos por fuertes vientos.....	17
2.1.6 Impactos por aumento del nivel del mar y marejadas de tormenta.....	18
2.2 Incidencias en el Sistema Ferroviario Mexicano.....	19
2.3 Impacto futuro del clima en las vías férreas.....	23
3. Identificación de la infraestructura ferroviaria expuesta.....	25
3.1 Exposición de la infraestructura ferroviaria.....	25
3.2 Exposición a amenazas climáticas.....	26
3.3 Exposición al cambio climático.....	28

3.4	Potencial uso de la información de la exposición.....	31
4.	Adaptación de la infraestructura ferroviaria al cambio climático.....	33
4.1	Infraestructura ferroviaria resiliente al clima	33
4.1.1	Amenazas a la integridad de la infraestructura ferroviaria	34
4.1.2	Identificación de la infraestructura crítica y el mejoramiento de su resiliencia.....	35
4.1.3	Preparar.....	40
4.1.4	Prevenir	40
4.1.5	Proteger	41
4.1.6	Responder	41
4.1.7	Recuperar.....	42
4.1.8	Adaptar	42
4.2	Medidas de adaptación al clima.....	42
4.2.1	Estrategias de adaptación de la infraestructura ferroviaria al cambio climático.....	43
4.2.2	Gestión del riesgo.....	47
4.2.3	Atención de emergencias	47
4.3	Información climática necesaria para definir medidas de adaptación.....	48
	Conclusiones.....	51
	Bibliografía	53

Sinopsis

En el presente trabajo se establecen algunas de las consideraciones que se deben tener presentes para la inclusión de criterios de adaptación al cambio climático en la planeación, construcción, reconstrucción y mantenimiento del Sistema Ferroviario Mexicano.

Adicionalmente, se mencionan algunos los posibles impactos que tendrá la red ferroviaria y su operación debido a los efectos del cambio climático, así como la información básica para definir las medidas de adaptación que requiere la infraestructura ferroviaria estratégica del país, con el fin de reducir costos futuros y, por ende, maximizar la rentabilidad de las inversiones.

Finalmente, se incluyen recomendaciones para implementar las medidas de adaptación como parte de un proceso integral de gestión de riesgos en la infraestructura ferroviaria existente en el país, mediante las cuales se pueda mejorar la resiliencia y/o establecer mecanismos para responder rápidamente ante las emergencias, de tal manera que se logren mitigar algunos de los impactos negativos como la interrupción de las cadenas logísticas.

Abstract

This work establishes some of the considerations that should be taken into account for the inclusion of adaptation criteria to climate change in the planning, construction, reconstruction and maintenance of the Mexican Railway System.

Additionally, some of the possible impacts that the railway network and its operation will have due to the effects of climate change are mentioned, as well as the basic information to define the adaptation measures required by the country's strategic railway infrastructure, in order to reduce costs. futures and, therefore, maximize the profitability of investments.

Finally, recommendations are included for implementing adaptation measures as part of a comprehensive risk management process in the country's existing railway infrastructure, through which resilience can be improved and/or mechanisms can be established to respond quickly to emergencies, in such a way that some of the negative impacts such as the interruption of logistics chains are mitigated.

Introducción

Las sociedades pueden responder al cambio climático adaptándose a sus impactos y reduciendo las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), de tal forma que se reduzca la tasa y la magnitud del cambio. Por tanto, la política para el cambio climático comprende dos pilares: (1) mitigación del cambio climático, y (2) adaptación al cambio climático (Rübbelke, 2011).

La mitigación es fundamental para “atenuar” los efectos del cambio climático tanto como sea posible, aunque algunos impactos ya no se pueden evitar y, por tanto, es esencial la adaptación a dichos impactos, la cual será un proceso continuo que estará presente en las próximas décadas.

En México se tiene el gran reto de avanzar en el cumplimiento de los diecisiete objetivos de las Naciones Unidas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. En términos de infraestructura para el transporte, el objetivo 9 busca establecer acciones en los países para “construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación” (Jefatura de la Oficina de la Presidencia de la República [JOP], 2019). La principal meta del objetivo 9, es la 9.1, la cual busca “Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos” (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2023).

En el marco de las políticas públicas del Gobierno Federal encaminadas a la adaptación al cambio climático, en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) se han desarrollado diversos proyectos encaminados a fortalecer el proceso de adaptación de la infraestructura carretera en México (Mendoza et al., 2017 y 2019; Gradilla et al., 2018 y 2022).

Para continuar con la línea de trabajo sobre adaptación al cambio climático, pero ahora aplicada a la infraestructura ferroviaria, se desarrolló el presente trabajo para identificar y establecer algunas de las consideraciones que se deben tener presentes para la inclusión de criterios de adaptación al cambio climático en la planeación, construcción, reconstrucción y el mantenimiento del Sistema Ferroviario Mexicano.

Los resultados alcanzados en esta investigación, en el capítulo 1, ponen de relieve la importancia que el sistema ferroviario tiene y el impulso actual que las políticas públicas tienen al plantearse una cartera de proyectos ferroviarios a construir en los próximos años. Se incluye también una breve reseña de los elementos que conforman la infraestructura ferroviaria para quienes no estén involucrados en el tema, mismos que son retomados para identificar los impactos potenciales del cambio climático.

En el capítulo 2 se presentan los impactos que el cambio climático está teniendo sobre la infraestructura ferroviaria, los elementos que la conforman y sus operaciones. Estos impactos están asociados a las altas temperaturas, las precipitaciones, el aumento del nivel del mar, la sequía, etc.

Para evaluar la exposición de la infraestructura ferroviaria se realizó, en el capítulo 3, una superposición de capas de peligros climáticos y de escenarios climáticos para visualizar los sitios/regiones en los que se espera que se presenten niveles altos o muy altos de riesgos climáticos, que pudieran afectar las vías férreas, con el objetivo de identificar los tramos ferroviarios y los activos amenazados, para posteriormente evaluar su vulnerabilidad con estudios específicos de ingeniería.

Aunque el ejercicio realizado en el capítulo 3 no es exhaustivo en cuanto a la totalidad de amenazas de la red, sí es información de entrada valiosa para la adaptación al cambio climático de la infraestructura férrea, que es abordada en el capítulo 4.

En el capítulo 4 se detalla la adaptación al cambio climático de la infraestructura férrea, incluyendo la gestión de riesgos y el enfoque de resiliencia, para encaminar el proceso de adaptación, mismo que tiene como objetivo principal prever los efectos adversos del clima y tomar las medidas adecuadas para evitar o minimizar los daños que puedan causar, con el fin de reducir costos futuros y, por ende, maximizar la rentabilidad de las inversiones, incluyendo el impacto indirecto en las cadenas logísticas de transporte.

Este trabajo se enmarca en la línea de investigación “Mitigación y adaptación al cambio climático” del IMT, además está alineado al objetivo prioritario 1 “Contribuir al bienestar social mediante la construcción, modernización y conservación de infraestructura carretera accesible, segura, eficiente y sostenible, que conecte a las personas de cualquier condición, con visión de desarrollo regional e intermodal” del Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024.

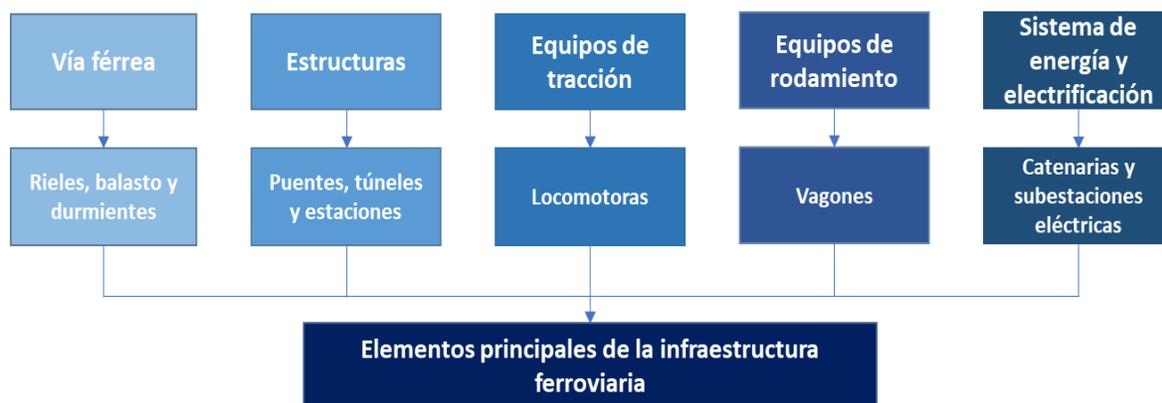
Adicionalmente, el proyecto se alinea al objetivo 1.9 “Construir un país más resiliente, sostenible y seguro”, ligado al Programa Especial de Cambio Climático 2019-2024, con el objeto de aumentar los niveles de resiliencia en la infraestructura para el transporte.

1. Antecedentes

La infraestructura para el transporte está conformada por todas aquellas instalaciones fijas, estructuras, equipos, etc., que proporcionan un servicio para la movilidad de personas y mercancías, las cuales se agrupan principalmente por modo de transporte, tales como carreteras o vialidades urbanas, vías férreas, puertos marítimos, aeropuertos, o una intersección entre estos que promueve el multimodalismo.

En la presente publicación nos enfocaremos en la infraestructura ferroviaria que incluye vías férreas (infraestructura física) y ferrocarriles (locomotoras y carros que circulan durante la operación de este sistema).

El sistema ferroviario está constituido por una serie de subsistemas: infraestructura (subrasante/terraplenes, puentes, túneles, etc.), superestructura (rieles, durmientes, balasto, etc.), instalaciones para el control del tránsito ferroviario, sistema de señalización, sistema de comunicación, sistema de alimentación (catenaria, cables, etc.) y vehículos (locomotoras y carros de arrastre), tal y como se ilustran en la Figura 1.1.



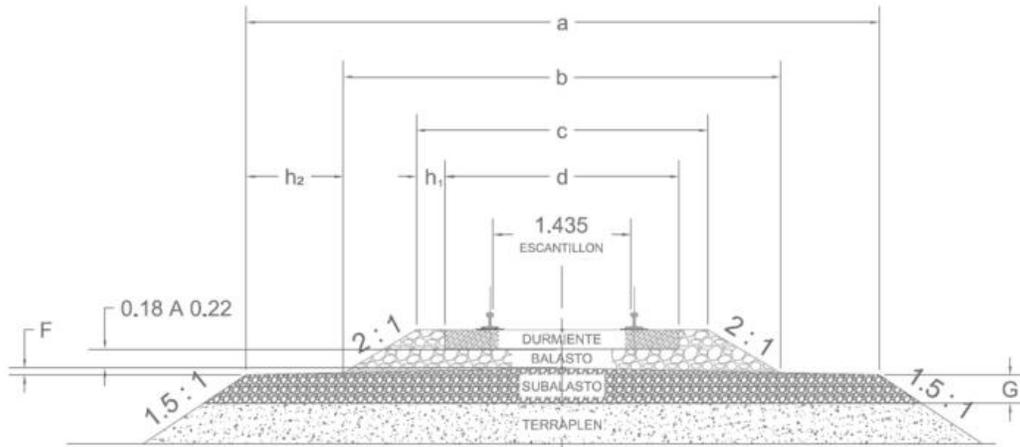
Fuente: Elaboración propia.

Figura 1.1 Esquema de elementos principales de la infraestructura ferroviaria

El diseño de la infraestructura es similar a una carretera y, por lo tanto, su sensibilidad (grado en el que el elemento puede ser afectado por su estado físico), mientras que los componentes de la superestructura es la que se diseña para el tránsito del ferrocarril y para soportar las cargas de éste.

1.1 Elementos de la infraestructura ferroviaria

Una sección transversal típica de la superestructura de una vía férrea en México se muestra en la Figura 1.2 y los parámetros mínimos se presentan en la Tabla 1.1.



Fuente: Ferromex (2015).

Figura 1.2 Sección transversal de vía férrea

Las características del material de sub-balasto están en función de normas específicas de referencia, que en general son: tamaño máximo de grano 7.60 mm, límite líquido máximo 40%, índice plástico máximo 12%, valor soporte de California CBR mínimo 20%, expansión máxima 2%, grado de compactación Proctor $100\% \pm 2$, entre otras. También existen normativas específicas para la capa subyacente y el cuerpo de terraplén.

Tabla 1.1 Parámetros mínimos de vía férrea

Letra para localización	Parámetro	Dimensión mínima
a	Ancho de corona del terraplén	660 cm
b	Base sección del balasto	456 cm
c	Corona de sección de balasto	304 cm
d	Longitud de durmiente madera	244 cm
h_1	Ancho de hombro de balasto	30 cm
h_2	Ancho de hombro del terraplén	102 cm
E	Espesor mínimo de balasto bajo el durmiente	20 cm
F	Bombeo del sub-balasto	2%
G	Espesor del sub-balasto	30 cm

Fuente: Ferromex (2015).

Cada componente de la superestructura contribuye de manera significativa a la funcionalidad integral de la infraestructura ferroviaria.

A continuación, se definen algunos elementos que constituyen la superestructura:

Riel: Elementos longitudinales que sirven como la base sobre la cual los trenes se desplazan. Proporcionan la dirección y el soporte, son parte fundamental de las vías férreas. Los componentes característicos de un riel son el alma, la cabeza y el patín (Grupo LET, 2023).

Durmiente: Elemento de apoyo de madera, concreto o metal sobre el que se sujetan los rieles, constituyendo el punto de unión entre estos y el balasto; tiene dos funciones: mantener el espaciamiento de los rieles (es decir, el ancho de vía) y transmitir los esfuerzos que recibe al balasto subyacente (ADIF, 2023).

Balasto: Grava o piedra partida heterogranular que, formando una capa o banqueta, se extiende bajo otros componentes que integran la vía férrea y sobre la explanación para asentar y sujetar los durmientes que soportan los rieles. Se trata de un tipo de piedra con unas características especiales de resistencia y dureza (ADIF, 2023).

Sub-balasto: Material granular que constituye la capa superior de la plataforma a nivel de terracerías o subrasante sobre la que apoya el balasto. Esta capa debe tener características de capacidad de carga y de drenaje significativas.

Algunos elementos operativos son:

Locomotora: Máquina que, montada sobre ruedas y propulsada por vapor, electricidad o motor de combustión interna, arrastra los vagones de un tren (RAE, 2023).

Vagón: Unidad móvil ferroviaria sin sistema de propulsión propio, destinada al transporte de mercancías (ADIF, 2023). De este tipo de vagones puede haber muchas variaciones dependiendo del tipo de mercancía a transportar, o del nivel de servicio para pasajeros.

Dependiendo del tipo de infraestructura, se requieren diferentes equipamientos para las vías, tales como:

Catenaria: Línea aérea de contacto de suspensión longitudinal, a través de la cual el pantógrafo de las locomotoras eléctricas capta la corriente de tracción (ADIF, 2023). La catenaria es el cable, pero requiere infraestructura adicional, como postes, ménsulas, etc.

Existen otros equipos para el mantenimiento de la infraestructura, o equipamiento para la operación de la infraestructura que no se detallarán en el presente trabajo, pero que de alguna manera sí pueden verse afectadas por el cambio climático.

1.2 Sistema Ferroviario Mexicano

En el año 2022, México contaba con 26,914 km vías de ferrocarril, de los cuales 17,360 km correspondieron a vías principales y secundarias concesionadas, 4,474 km a vías auxiliares (patios y laderos) y 1,555 km a vías particulares; dichas vías en conjunto sumaron un total de 23,389 km de red en operación (Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT], 2023 y Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario [ARTF], 2023).

La Figura 1.3 muestra el Sistema Ferroviario Mexicano (SFM), el cual incluye las empresas asignatarias y concesionarias de la red, la cual está destinada principalmente al movimiento de mercancías.



Fuente: Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (2020).

Figura 1.3 Sistema Ferroviario Mexicano

Durante el año 2022, en el Sistema Ferroviario Mexicano se transportaron cerca de 128.5 millones de toneladas de carga y 41 millones de pasajeros, la gran mayoría de los pasajeros fueron transportados en el Tren Suburbano de la Zona Metropolitana del Valle de México y menos del 1% restante en los tres servicios de pasajeros de carácter especial y turístico¹ con los que se cuenta en el país (SICT, 2023).

En años recientes, las políticas públicas del Gobierno Federal han incluido el desarrollo de proyectos ferroviarios nuevos para pasajeros, por lo que a la red ferroviaria se estarán sumando el Tren México-Toluca (servicio para pasajeros), Tren Corredor Interoceánico (servicio mixto) y el Tren Maya (servicio mixto), entre otros, que se encuentran en cartera; por lo que se requerirá incrementar el conocimiento en la materia (diseño, mantenimiento y operación de sistemas ferroviarios), incluyendo los efectos que el cambio climático tendrá en la infraestructura ferroviaria y su operación.

El Gobierno de México pretende sumar más de 4,000 km de nuevas líneas ferroviarias a la red nacional a través de 15 proyectos, de los cuales seis están en ejecución, cuatro están por iniciarse y cinco se encuentran en etapa de estudio, según una presentación de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). Los proyectos referidos se ilustran en la Figura 1.3.



Fuente: Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT] (2022).

Figura 1.3 Programa Nacional Ferroviario

¹ Ferrocarril Chihuahua-Pacífico, Tren de la Vía Corta de Tijuana-Tecate y Tren Tequila Exprés. A los trenes de pasajeros existentes se sumará el Tren Maya, con aproximadamente 1,460 km y el Tren México-Toluca de 57.9 km de longitud.

En general, el Sistema Ferroviario Mexicano ofrece servicio de carga y pasajeros, el cual opera bajo un modelo de concesiones. El servicio de pasajeros se concentra en los sistemas de trenes suburbanos en la Zona Metropolitana del Valle de México, mientras que el resto de la red ferroviaria se centra en movilizar carga y algunos tramos son utilizados para trenes con un enfoque netamente turístico,

Derivado del auge que actualmente se tiene en el país por retomar al ferrocarril como una opción adicional para el transporte de pasajeros y de la carga, es importante evaluar como estos proyectos pueden verse afectados por riesgos asociados al cambio climático y fenómenos meteorológicos extremos.

2. Principales impactos del cambio climático en la infraestructura ferroviaria

De acuerdo con el informe del Grupo de Trabajo I del Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC, por sus siglas en inglés] (2021), se proyectan cinco escenarios de emisión ilustrativos que cubren un amplio rango de evolución futura de impulsores antropogénicos del cambio climático. Los escenarios se denominan SSP² x-y, donde “x” se refiere a la trayectoria socioeconómica compartida e “y” al nivel aproximado de forzamiento radiactivo alcanzado en el año 2100.

En el corto plazo (2021-2040), en el escenario de emisiones de CO₂ muy bajas SSP 1-1.9, es muy probable que la temperatura global promedio de la superficie aumente entre 1.2°C y 1.7°C, en comparación con 1850-1900, entre 1.2°C y 1.8°C en el escenario de emisiones bajas SSP 1-2.6, en el de emisiones medias SSP 2-4.5 y en el escenario de emisiones altas SSP 3-7.0; y entre 1.3°C y 1.9°C en el escenario de emisiones muy altas SSP 5-8.5.

Con un calentamiento global de 1.5°C, se prevé que las precipitaciones intensas y las inundaciones asociadas se intensifiquen y sean más frecuentes en la mayoría de las regiones de África y Asia, América del Norte y Europa. Asimismo, también se prevé que las sequías agrícolas y ecológicas sean más frecuentes y/o graves en algunas regiones de todos los continentes, excepto en Asia, y se espera un aumento de las sequías meteorológicas en algunas regiones.

Estas proyecciones climáticas tendrán implicaciones en todos los sectores productivos, incluidos el transporte, por lo que los países deben evaluar los efectos que el cambio climático (de acuerdo con las diferentes trayectorias SSP) tendrá sobre los sistemas de transporte, tanto en la operación como en la integridad de su infraestructura.

La exposición actual y futura de la infraestructura ferroviaria al cambio climático y a los eventos extremos, reduce significativamente la vida útil

² Por las siglas en inglés de *Shared Socioeconomic Pathways*

del proyecto, ya que las condiciones de diseño originales se encuentran en la mayoría de los casos rebasadas, representando una amenaza para la seguridad y confiabilidad del servicio en la etapa de operación, y costos adicionales para el mantenimiento de la infraestructura.

Adicionalmente, existen otras afectaciones directas para el equipo de tracción (locomotoras) y para el equipo de rodamiento (vagones/carros), tales como el sobrecalentamiento, aumento del consumo energético, reducción de la velocidad bajo estrés climático, entre otros.

2.1 Impactos del cambio climático y el clima extremo en la infraestructura ferroviaria

Existen diferentes amenazas climáticas para los sistemas ferroviarios que provocan diferentes impactos en la operación y en la infraestructura. A continuación, se presenta un resumen de ellos.

2.1.1 Impactos por altas temperaturas

Las altas temperaturas, como consecuencia del cambio climático, imponen desafíos significativos a la infraestructura ferroviaria.

Cuando la temperatura ambiente excede los 30°C, el estrés térmico se añade a la tensión de velocidad de un tren en movimiento, lo que puede pandear la vía férrea. Por el aumento térmico y la exposición directa a la luz solar, la temperatura interna de un riel puede superar hasta en 20°C la temperatura externa, resultando en la dilatación del riel. Este fenómeno conduce a la desalineación lateral de las vías y aumenta el riesgo de descarrilamientos (Palin *et al.*, 2013).

Algunos de los posibles impactos por el aumento generalizado de la temperatura son:

- Pandeo de los rieles y/o problemas de desalineación (ver ejemplo en la Figura 2.1), esto debido a que el acero de los rieles se expande con las altas temperaturas.
- Expansión de los activos móviles, como los puentes giratorios y aparatos de vía, que dificultan el funcionamiento, ya que no se acoplan adecuadamente.
- Aumento generalizado de la tasa de fallos de los activos a altas temperaturas (sistemas de señalización, etc.).
- Pandeo de la catenaria en las líneas electrificadas.
- Incremento del riesgo de incendios forestales o de la vegetación aledaña a la vía férrea, debido al aumento de las olas de calor y de los periodos de sequía (ver ejemplo en la Figura 2.2).

- Modificaciones en las tensiones en el anclaje que sujeta al riel con el durmiente.
- Las afectaciones en los rieles tienen un impacto importante en las demoras operacionales de los ferrocarriles.



Fuente: <https://www.networkrailmediacentre.co.uk>

Figura 2.1 Pandeo del riel por altas temperaturas



Fuente: Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

Figura 2.2 Incendio forestal en el estado de Chihuahua

2.1.2 Impactos por bajas temperaturas

Al analizar los principales impactos del cambio climático en la infraestructura ferroviaria, es crucial entender que no todos los efectos están relacionados con el calor (altas temperaturas).

Las condiciones de bajas temperaturas pueden plantear un conjunto único de desafíos para las operaciones ferroviarias. Desde la congelación y expansión de los materiales de la vía hasta el impacto en los sistemas eléctricos y el aumento del riesgo de roturas de rieles, las bajas temperaturas pueden afectar seriamente la fiabilidad y seguridad de la infraestructura ferroviaria (Stenström *et al.*, 2012).

Los posibles impactos por bajas temperaturas son los siguientes:

- Fractura de rieles, grietas y/o problema de desalineación, debido a que el acero de los rieles se tensa con las bajas temperaturas.
- Inundaciones por granizadas que dañan las infraestructuras, especialmente a los puentes.
- Las bajas temperaturas pueden congelar el suelo de cimentación, que puede provocar movimientos en los materiales por la expansión y contracción del suelo.
- En el caso de la presencia de nieve, ésta tiende a bloquear la visibilidad del riel para el conductor del tren.
- Reducción de los niveles de fricción del contacto de las ruedas de los vehículos con el riel, disminuyendo su capacidad de frenado.
- Las líneas electrificadas pueden ser vulnerables debido a que el suministro de energía puede verse afectado.

2.1.3 Impactos por precipitación intensa

Las precipitaciones intensas pueden provocar inundaciones en la infraestructura ferroviaria, ya que el agua de la precipitación, los escombros y el barro pueden bloquear las vías y dañar los diversos elementos, principalmente en tramos que están contruidos en zonas con taludes de cortes/laderas o túneles a un nivel inferior, sin tomar en cuenta el debido diseño del drenaje; además, los deslizamientos de tierra de igual forma pueden ser provocados por precipitaciones intensas, ya que estos ocurren cuando el agua en el suelo la separa, perdiendo adherencia/cohesión, lo que reduce la fuerza que tiene un talud para mantenerse en pie, provocando que éste comience a deslizarse cuesta abajo, obstruyendo la vía férrea y, en algunas ocasiones, provocando daños severos a la infraestructura ferroviaria (National Rail UK, 2023).

Los posibles impactos por el aumento de episodios de precipitación intensa son los siguientes:

- Aumento del riesgo de falla en taludes de corte y laderas, provocando movimientos de tierra y desprendimiento de materiales.
- Aumento del riesgo de socavación de los puentes (estribos y pilas) debido a las inundaciones.
- Falla/colapso de los elementos de soporte de otras estructuras debido a un mayor riesgo de socavación.
- El agua acumulada contamina y dispersa el balasto de la vía, afectando su desempeño, estabilidad y durabilidad.
- Aumento del riesgo de aluviones, que a su vez provocan daños estructurales en los elementos de la infraestructura férrea.
- Caídas de material sobre las vías, en túneles y en sus accesos, que pueden provocar descarrilamientos (véase Figura 2.3).
- Afectaciones a los sistemas de drenaje por el incremento de la precipitación.
- Afectaciones en el servicio como consecuencia de obstáculos en las vías e inundaciones debido a las lluvias intensas (véase Figura 2.4).



Fuente: <http://lanotadeguadalajara.com/>

Figura 2.3 Deslaves de taludes



Fuente: <https://www.ice.org.uk/>

Figura 2.4 Inundación de la superestructura

2.1.4 Impactos por sequía

La sequía reduce la humedad del suelo y, por lo tanto, su capacidad de carga, lo que puede provocar hundimientos/agrietamientos del suelo de cimentación y, por lo tanto, pérdida de estabilidad para las capas de sub-balasto y balasto, que conllevan a una desnivelación de durmientes y de los rieles.

Algunos de los posibles impactos por sequía son:

- Aumento del riesgo de fallas estructurales debido a los movimientos de tierra provocados por la sequedad, ya sea en el suelo de cimentación o en los taludes.
- Desalineación de la vía férrea.
- Pérdida de vegetación y, por lo tanto, habrá un aumento de la erosión del suelo y un cambio en los patrones de escurrimiento superficial.

La vegetación junto a las vías suele ser una fuente estabilizadora del suelo y controla los escurrimientos que atraviesan la infraestructura férrea (Szymczak *et al.*, 2023).

2.1.5 Impactos por fuertes vientos

Los vientos fuertes representan un factor crítico en la infraestructura ferroviaria, con la capacidad de desencadenar diversos riesgos y desafíos operativos. Investigaciones detalladas en diferentes países han revelado que la fuerza del viento puede provocar la pérdida de contacto del colector de corriente con el hilo de contacto, aumentando así el riesgo de descarrilamiento o vuelco del tren. Este fenómeno se presenta principalmente en sistemas de alta velocidad electrificados (Andersson *et al.*, 2004; Diedrichs *et al.*, 2007; Baker *et al.*, 2004).

Especialmente destacable es la investigación realizada en Austria, donde se evidenció que vientos con velocidades superiores a 120 km/h pueden, bajo ciertas condiciones, volcar un tren o causar daños significativos. Velocidades de viento superiores a 130 km/h pueden inducir vibraciones en el hilo de contacto, aumentando así el riesgo de problemas graves con el colector de corriente. Además, los vientos fuertes tienen la capacidad de desplazar vagones de carga estacionados y mover la carga dentro de ellos (Rachoy & Spazierer, 2008).

Dichos vientos también pueden ocasionar accidentes y perturbaciones en la red ferroviaria debido a la colisión de trenes con árboles caídos, ramas o escombros de construcción depositados en las vías por los fuertes vientos (Baker *et al.*, 2009).

Algunos de los posibles impactos por un aumento de la intensidad máxima en las rachas de viento son los siguientes:

- Mayor riesgo de caída de hojas que provoca una baja adherencia de la vía férrea.
- Caída de árboles y ramas a las vías férreas (véase la Figura 2.5).
- Carga excesiva de viento en estructuras como postes y torres (incluye la catenaria y el señalamiento), que pueden provocar su caída.
- Erosión de las capas de balasto y sub-balasto debido a las fuertes masas de aire.
- Mayor riesgo de daños en los puentes, en caso de vientos fuertes (para la infraestructura y la operación).
- Inestabilidad de los vagones, particularmente tratándose de doble estiba.
- Arrastre de sedimentos y escombros que caen sobre las vías.



Fuente: <https://www.nationalrail.co.uk/high-winds/>

Figura 2.5 Obstrucción de las vías por fuertes vientos

2.1.6 Impactos por aumento del nivel del mar y marejadas de tormenta

El aumento del nivel del mar y las marejadas de tormenta son problemas que enfrentará la red ferroviaria mexicana debido a su ubicación en algunos tramos cercanos a las costas, por ende, el impacto potencial en puentes, vías y estructuras ferroviarias es sustancial, afectando no solo la operatividad sino también la seguridad del sistema.

El aumento del nivel del mar, incluso de 30 a 40 cm en las próximas décadas, puede tener graves consecuencias, tanto para tramos de ferrocarril que estén cercanas a la costa y para ferrocarriles en ciudades ubicados en las desembocaduras de los ríos. En este sentido, es necesario construir infraestructuras de protección adicionales en la costa (Baker et al., 2009).

Las líneas férreas cercanas a la costa en México son aquellas que conectan a los puertos marítimos, por lo que son de alta importancia para las cadenas logísticas.

Los posibles impactos por aumento del nivel del mar y marejadas de tormenta son los siguientes:

- Erosión costera que provoca socavación en la superestructura de la vía férrea.
- Inundación de la superestructura de la vía férrea.
- Formación de olas significativas que provocan daños en la vía.
- Acumulación de escombros en la vía férrea.
- Un oleaje excesivo puede desestabilizar la estructura ferroviaria, provocando su colapso.
- Deterioro de los rieles por su contaminación salina.
- Interrupción del servicio por efectos del oleaje.

2.2 Incidencias en el Sistema Ferroviario Mexicano

La Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (ARTF) publica trimestralmente el Pulso del Sistema Ferroviario Mexicano - Seguridad, con el objetivo de dar a conocer los reportes relacionados con bloqueos y seguridad tanto operativa (siniestros) como pública (robo a carga y vandalismo). Estos se clasifican conforme se indica en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Clasificación de siniestros ferroviarios

Grupo de siniestro	Tipo de siniestro
Grupo I. Cruces a nivel	Arrollamiento de Vehículo
	Impacto a Tren
Grupo II. Equipo ferroviario, infraestructura y operación	Afectación al paso de trenes por cables de CFE
	Alcance
	Asentamiento/Terraplén
	Cambio trillado
	Choque
	Choque técnico
	Confinamiento dañado
	Daño a Instalaciones
	Desacoplamiento de manguera de aire
	Descarrilamiento
	Deslave/ derrumbe
	Equipo en mal estado
	Faltas al reglamento interno de transporte
	Incendio
	Inundación
	Objetos sobre la vía
	Pérdida de comprobación a vía directa de aguja de cambio
	Pérdida de energía catenaria
	Pérdida de potencial
	Rozamiento
Vía en mal estado	

Grupo de siniestro	Tipo de siniestro
Grupo III. Muerte, lesión y otros	Accidente personal ferroviario
	Cadáver sobre la vía/ en derecho de vía
	Persona arrollada
Grupo IV. Materiales o residuos peligrosos	Fuga/Derrame
	Artefacto explosivo

Fuente: ARTF (2023).

Del periodo del 2016 al tercer trimestre de 2022 (último informe disponible en línea), se tiene 8690 registros de incidencias del Grupo II, de los cuales 344 corresponden a impactos climáticos y geotécnicos. La Tabla 2.2 muestra este resumen. La estadística detalla fecha y localización del incidente, pero no la descripción de éste, por lo que se estima que incidencias tales como el descarrilamiento pueden estar asociadas a amenazas climáticas.

Tabla 2.2 Incidencias climáticas y geotécnicas (2016-2023)

Tipo de incidencia	Número de eventos
Asentamiento/Terraplén	3
Desastre natural (causa no identificada)	2
Deslave/ derrumbe	174
Incendio	86
Inundación	79
Total	344

Fuente: Elaboración propia con Información del ARTF (2023).

En una búsqueda realizada por los autores, en fuentes hemerográficas, se identificaron algunas incidencias que se ilustran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Incidencias en vías férreas atribuidas al clima

Tipo de incidencia	Imagen	Descripción
Asentamiento		Las fuertes lluvias provocaron un reblandecimiento del suelo provocando el descarrilamiento.

Tipo de incidencia	Imagen	Descripción
Deslizamiento de tierras		<p>Se presentó un deslizamiento de tierras y rocas, ocasionado por fuertes lluvias, provocando el descarrilamiento del tren.</p>
Deslave		<p>Se presentó un deslave por corrientes de agua dañando las vías y provocando un descarrilamiento.</p>
Asentamiento		<p>Las fuertes lluvias provocaron un reblandecimiento de la tierra afectado las vías férreas.</p>
Asentamiento / Inundación		<p>Fuertes lluvias provocaron el descarrilamiento del tren por reblandecimiento de la tierra</p>

Tipo de incidencia	Imagen	Descripción
Erosión de puente		<p>Las pilas del puente ferroviario se encuentran erosionadas tras paso de lluvias extremas que desbordaron el río.</p>
Asentamiento		<p>El reblandecimiento de tierras por lluvias provocó un descarrilamiento.</p>
Deslizamiento		<p>Se presentó un descarrilamiento por derrumbe de piedras sobre la vía férrea.</p>
Altas temperaturas		<p>Se presentaron problemas con el riel por las altas temperaturas y ondas de calor.</p>

Tipo de incidencia	Imagen	Descripción
Deslizamiento		Deslizamiento de ladera sobre la vía férrea provocada por el reblandecimiento del material, por lluvias intensas.
Altas temperaturas		Se presentó un descarrilamiento por pandeo del riel provocando la volcadura del tren.

Fuente: <https://www.unotv.com/noticias/estados/nayarit/detalle/lluvias-provocan-descarrilamiento-de-tren-en-nayarit-785492/>
<https://www.adn40.mx/estados/chepe-descarrilamiento-lluvias-chihuahua-ldb>
www.elsoldeorizaba.com.mx/policiaca/descarrilan-10-vagones-del-tren-en-canada-morelos-accidentes-ferrocarriles-de-mexico-ssp-6365900.html
<https://www.elsoldeorizaba.com.mx/policiaca/se-descarrila-ferrocarril-en-el-tramo-tecamalucan-sierra-de-agua-8509935.html>
<https://www.tn8.tv/america-latina/460207-fuertes-lluvias-provocan-descarrilamiento-tren-morelia-mexico/>
<https://periodicocorreo.com.mx/puente-de-rio-silao-base-se-desmorona-dejando-gran-riesgo/>
<https://vanguardia.com.mx/noticias/nacional/descarrila-tren-en-veracruz-JMVG3041338>
<https://www.elsoldelcentro.com.mx/local/descarrilamiento-por-causas-naturales-1665603.html>
<https://colima.quadratin.com.mx/jalisco/descarrila-tren-en-tonilita-por-derrumbe-de-cerro-en-jalisco/>
<https://www.informador.mx/jalisco/Seguridad-en-Jalisco-Tren-se-descarrila-en-la-autopista-Guadalajara-Colima-20220202-0088.html>
<https://muchosdocpr.blogspot.com/2021/06/el-descarrilamiento-del-tren-en-tala.html>
<https://noticiasenlamira.com/estados/nevadas-en-coahuila-originan-descarrilamiento-de-tren/>
<https://www.elheraldodechihuahua.com.mx/local/suspenden-corridas-del-tren-por-deslave-en-las-vias-rumbo-a-cuauhtemoc-382464.html>

2.3 Impacto futuro del clima en las vías férreas

Los pronósticos indican que la duración, magnitud, escala y frecuencia de los impactos vinculados al clima aumenten y se agraven (Lavell *et al.*, 2012). Esto implica que el clima “extremo” que observamos en la actualidad podría transformarse en el clima “normal” en el futuro (Nolte *et al.*, 2011). El aumento de la media de las temperaturas, los niveles elevados del mar y

las precipitaciones, junto con eventos hidrometeorológicos más frecuentes y severos, generan riesgos específicos para la infraestructura ferroviaria (Marteaux, 2016).

Por lo que, la gestión de la resiliencia de la infraestructura de transporte frente al cambio climático se convierte en un desafío global complejo (Davies *et al.*, 2014). Los ferrocarriles no solo deben resistir las condiciones climáticas extremas actuales y recuperarse rápidamente de ellas, sino también estar preparados para operar en condiciones futuras (Blackwood *et al.*, 2022). Por ello, es importante pensar de manera inmediata en la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano al cambio climático.

3. Identificación de la infraestructura ferroviaria expuesta

Actualmente, gracias a los Sistemas de Información Geográfica, es posible hacer un análisis espacial de la infraestructura ferroviaria para estimar el nivel de exposición ante los efectos del cambio climático, dicho enfoque ayuda a elegir las medidas que permiten identificar la infraestructura que se encuentra altamente amenazada, para que se puedan realizar estudios específicos para adaptar la infraestructura al cambio climático.

A continuación, se describe el enfoque de la aproximación geoespacial y el tipo de información que es necesaria para la identificación de la exposición de la infraestructura ferroviaria en México.

3.1 Exposición de la infraestructura ferroviaria

El nivel de exposición en un sitio, y que lo convierten en vulnerable, puede estar basado en datos históricos y recientes, o también basarse en proyecciones climáticas de acuerdo con los diferentes escenarios asociados a las trayectorias de concentración de emisiones en la atmósfera (véase la Figura 3.1). Para ello, se requiere identificar y seleccionar las amenazas climáticas relevantes y, posteriormente, relacionarlas con la infraestructura para evaluar el nivel de exposición.

De acuerdo con el Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC] (2014), la exposición es la presencia de las personas, los medios de vida, especies o ecosistemas, las funciones, servicios y recursos ambientales, infraestructura o activos económicos, sociales o culturales, en sitios y entornos que podrían verse afectados de manera adversa.

México se encuentra expuesto a diferentes amenazas climáticas, particularmente aquellas del tipo hidrometeorológico, integrado por ciclones tropicales o huracanes, lluvias y precipitaciones intensas, etc. Por ello, es importante identificar los niveles de exposición para evaluar la vulnerabilidad de las vías férreas al cambio climático y al clima extremo.



Fuente: Elaboración propia, basado en UNECE (2013).

Figura 3.1 Proceso para la generación de mapas de riesgo en la infraestructura ferroviaria

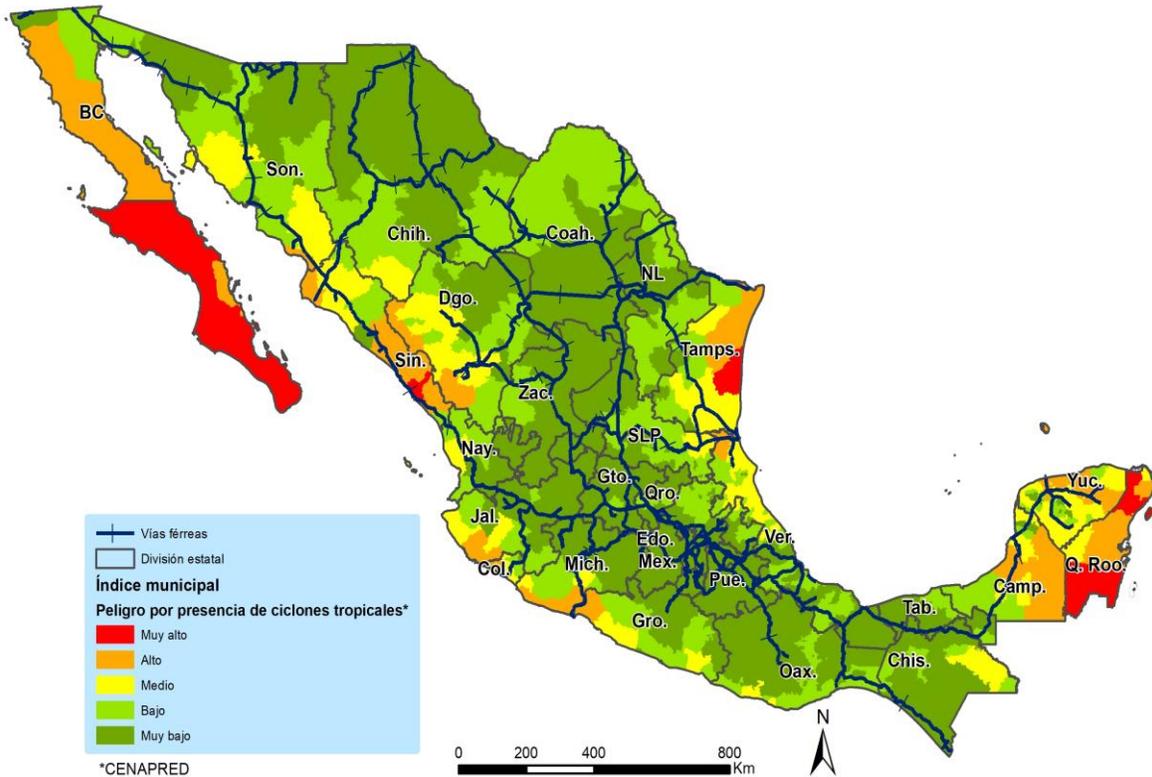
3.2 Exposición a amenazas climáticas

Los mapas de riesgos elaborados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), y que se encuentran disponibles en la página del Atlas Nacional de Riesgos (<http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/>), son un insumo esencial para poder realizar una superposición de capas, con el fin de evaluar el grado de exposición de la red ferroviaria a los diferentes riesgos.

El método de superposición de capas consiste en la combinación/unión de dos o más capas, donde cada una de ellas contiene información referenciada geográficamente.

Para identificar la exposición del Sistema Ferroviario Mexicano, se eligieron las capas de peligro por inundaciones y ciclones tropicales, las cuales se superpusieron sobre la capa de la red ferroviaria, de tal manera que se pudiera identificar el nivel de exposición de la red ante estas amenazas.

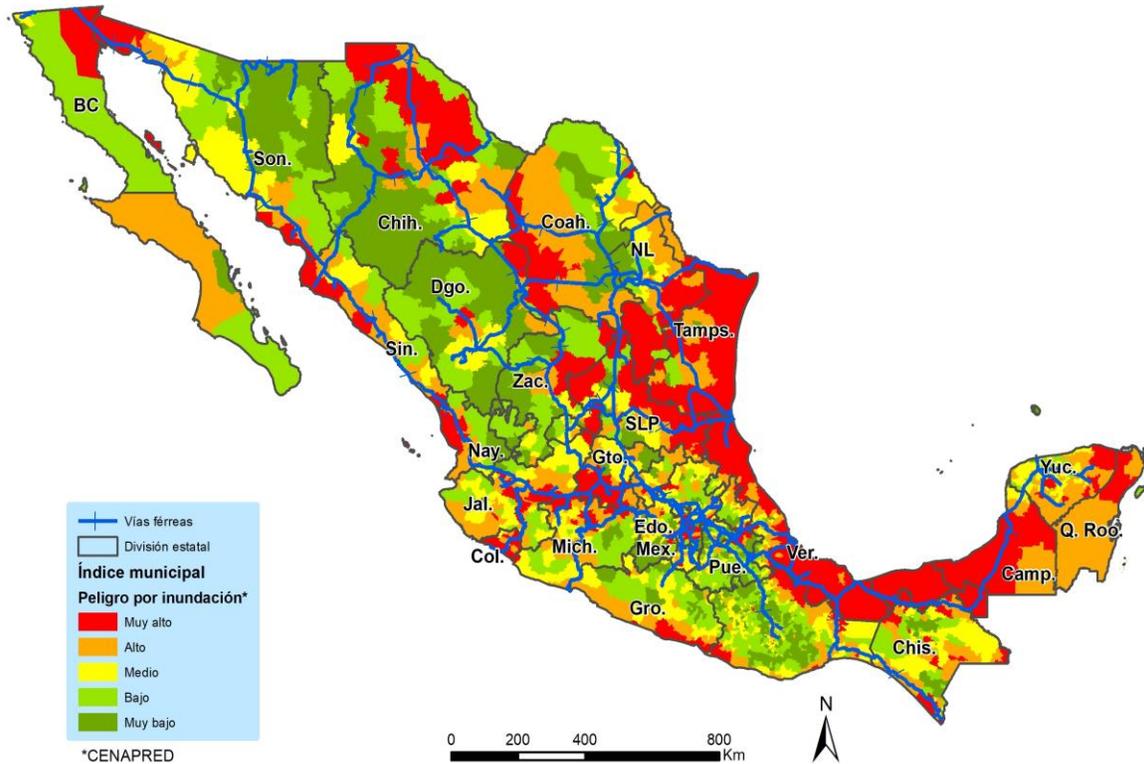
En la Figura 3.2 se muestran los resultados de la combinación de la capa de peligro a ciclones tropicales y la red ferroviaria. Los resultados permiten apreciar los tramos ferroviarios que se encuentra en niveles de exposición alto y muy alto, a ciclones tropicales, los cuales se encuentran principalmente en Sinaloa, Campeche y Yucatán, y los tramos que conectan al Puerto de Manzanillo y de Lázaro Cárdenas.



Fuente: Elaboración propia con información de CENAPRED y SICT.

Figura 3.2 Mapa de peligro de la infraestructura ferroviaria por presencia de ciclones tropicales

En la Figura 3.3 se muestra la combinación de la capa de peligro por inundación y la red ferroviaria. Los resultados permiten apreciar los tramos ferroviarios que se encuentran en niveles de exposición alto y muy alto, a inundaciones, los cuales se encuentran principalmente en Campeche, Veracruz y Tamaulipas; además, de acuerdo con los pronósticos del cambio climático, se estima que la zona del Golfo de México será susceptible a inundaciones por el aumento del nivel del mar.



Fuente: Elaboración propia con información de CENAPRED y SICT.

Figura 3.3 Mapa de peligro de la infraestructura ferroviaria por inundación

Este tipo de aproximaciones geospaciales puede realizarse para las diferentes amenazas climáticas, actuales y futuras, que estresan y continuarán comprometiendo la integridad tanto estructural como operacional de la red ferroviaria mexicana.

Actualmente se cuenta con indicadores de peligro a nivel municipal, por lo que sería necesario desarrollar indicadores de peligro con una mejor resolución.

3.3 Exposición al cambio climático

Para evaluar la exposición al cambio climático se requiere hacer uso de escenarios climático que son representaciones de cambios en el clima (es decir, el tiempo promedio a largo plazo) debido a cambios en la composición atmosférica u otros factores.

Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son

de utilidad para el análisis del cambio climático y, en particular, para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. La posibilidad de que en la realidad las emisiones evolucionen tal como se describe en alguno de estos escenarios es muy remota (IPCC, 2000).

Para el Reporte 5 del IPCC (2013), se definieron cuatro escenarios de emisiones, basados en las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), las cuales se caracterizan por su Forzamiento Radiactivo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m².

Las cuatro trayectorias RCP comprenden diferentes escenarios futuros:

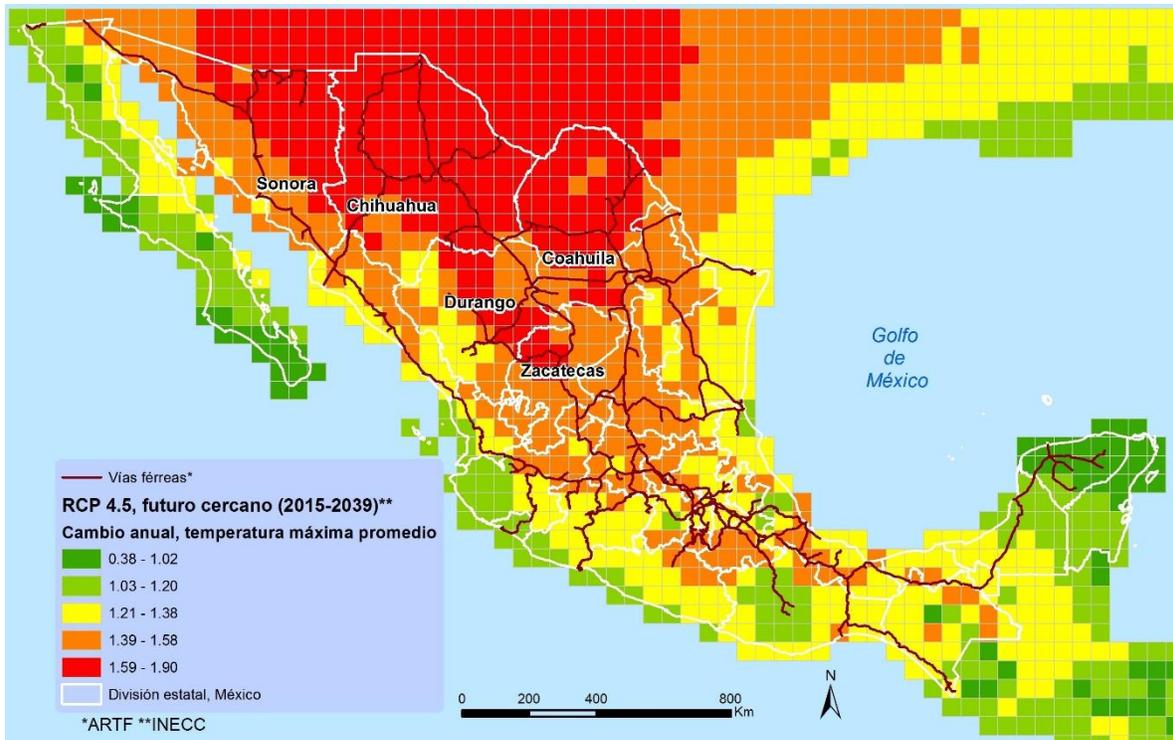
- RCP 8.5, es un escenario con alta concentración de emisiones (posible desarrollo para poblaciones numerosas, alto uso de energía fósil / carbón).
- RCP 6.0, es un escenario de mediana concentración de emisiones (escenario base de bajo a mediano o escenario de alta mitigación).
- RCP 4.5, es un escenario de mediana concentración de emisiones (escenario con una alta mitigación).
- RCP 2.6, es un escenario de baja concentración de emisiones.

Estos son los escenarios que actualmente se encuentran disponibles en México, aunque, como se indicó anteriormente, el Reporte 6 del IPCC (2021), hace referencia a una nueva clasificación de los escenarios en función de su trayectoria socioeconómica compartida (SSP).

En espera de la actualización de estos escenarios, para la presente investigación se utilizaron un par de ejemplos para evaluar el grado de exposición futuro que tendrá el sistema ferroviario actual a los cambios en la temperatura y en la precipitación.

Los escenarios utilizados fueron desarrollados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), quien es responsable de las políticas de cambio climático conjuntamente con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

El mapa de la Figura 3.4 muestra la exposición al aumento de las temperaturas combinado con la red ferroviaria actual, en el cual se puede observar que en los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila y Durango se presentarán cambios significativos que pueden afectar la integridad estructural de los elementos de la superestructura de la vía férrea, sobre todo aquellos que son más sensibles a las temperaturas, tales como los rieles, los tornillos y su sistema de sujeción, etc.



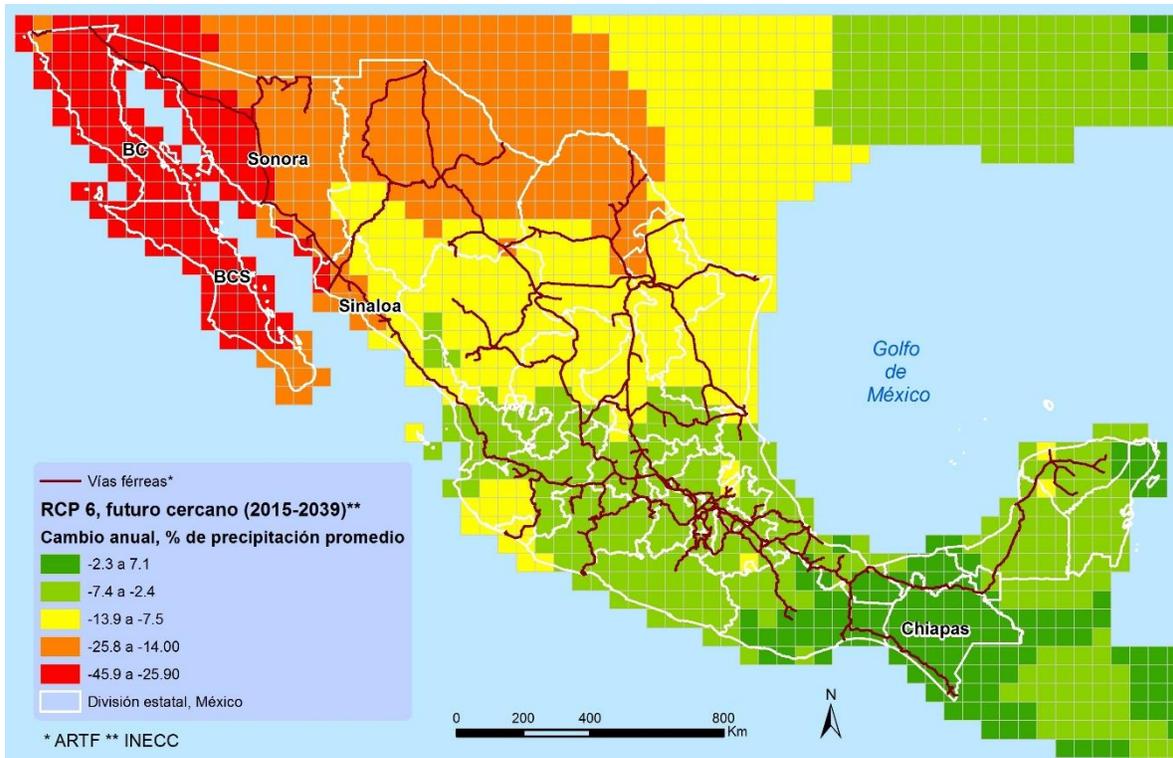
Fuente: Elaboración propia con información de INECC y ARTF/SICT.

Figura 3.4 Escenario RCP 4.5, futuro cercano del cambio de la temperatura máxima

El mapa de la Figura 3.5 muestra la exposición al cambio en la precipitación y la red ferroviaria nacional, en el cual se puede observar que en los estados de Sonora, Baja California y Baja California Sur habrá niveles muy altos de déficit de agua, mientras que para Chiapas se estima un incremento de la precipitación. Estos cambios significativos en la humedad de los suelos obligarán a:

- En algunas regiones, por la falta de agua (sequía), a reforzar la capacidad estructural del suelo de cimentación y considerar los cambios en la cubierta vegetal en la zona de influencia de la vía férrea.
- En otras regiones donde habrá más precipitación se deben tomar en cuenta los riesgos de inundación y analizar el funcionamiento tanto de las obras de drenaje menor como de los puentes.

Este tipo de análisis se pueden realizar para otros escenarios y horizontes futuros, con la finalidad de identificar los tramos ferroviarios expuestos y sus obras de drenaje, para poder realizar estudios más específicos que permitan evaluar la sensibilidad y, posteriormente, la vulnerabilidad de la infraestructura ferroviaria.



Fuente: Elaboración propia con información de INECC y ARTF/SICT.

Figura 3.5 Escenario RCP 6, para un futuro cercano del cambio de la precipitación promedio

3.4 Potencial uso de la información de la exposición

Una vez determinados los niveles de exposición de la red ferroviaria, se deben seleccionar los tramos ferroviarios que se encuentren en niveles altos y muy altos de exposición para que estos sean objeto de estudios más específicos, que permitan conocer la sensibilidad de la infraestructura y de los elementos que la integran; es decir, conocer el estado de los rieles, los durmientes, las capas de balasto y sub-balasto, la altura de la subrasante, el drenaje menor (alcantarillas) y mayor (puentes), taludes de corte y terraplén, y laderas, etc., para con ello evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura ferroviaria.

La vulnerabilidad para este caso sería una combinación de la exposición y la sensibilidad, que permitirá obtener el grado de vulnerabilidad de la infraestructura ferroviaria. Para ello se pueden utilizar diversas metodologías existentes, ya sean para carreteras (PIARC, 2015 y 2023) o ferrocarriles.

Los tramos ferroviarios que se identifiquen como vulnerables, de acuerdo con las evaluaciones realizadas, deberán someterse a un proceso de adaptación al cambio climático que se detallará en el capítulo siguiente.

La adaptación permite reducir los riesgos del cambio climático y los eventos extremos, para asegurar cierto grado de resiliencia de la red ferroviaria y aumentar la confiabilidad del servicio en el transporte de mercancías por ferrocarril en el país.

La adaptación es el proceso de adaptación al clima actual, o esperado, y sus efectos (IPCC, 2014). La adaptación de la infraestructura ferroviaria implica acciones (políticas, estrategias, ingeniería o basadas en la naturaleza) que permitirán que la infraestructura permanezca operando bajo la presencia de fenómenos climáticos extremos y sus efectos derivados, sin que resulten en fallas/daños que repercutan en cierres parciales o totales de la vía férrea.

Las medidas de adaptación deben ser específicas para cada país y región, ya que éstas varían en función del tipo de amenaza y de sus características.

4. Adaptación de la infraestructura ferroviaria al cambio climático

En este capítulo se describe el proceso continuo para mejorar la resiliencia de la infraestructura ferroviaria al cambio climático, que incluye a su vez un proceso adaptativo que involucra la implementación de diversas medidas tanto en el diseño de la infraestructura ferroviaria como en el mantenimiento y la gestión de ésta.

4.1 Infraestructura ferroviaria resiliente al clima

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define a la resiliencia como la capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un suceso, tendencia o perturbación peligrosa, respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura, conservando al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación.

La resiliencia es una cuestión de un cierto grado de robustez y nunca de completa inmunidad contra el estrés o los eventos perturbadores. Por lo tanto, las sociedades y los ecosistemas pueden ser más o menos resilientes, pero los sistemas altamente robustos eventualmente sucumbirán si los eventos que perturban al sistema se vuelven más poderosos o si se mezclan con un tipo de estrés hacia el cual el sistema no está adaptado.

Para el caso del clima como evento perturbador, se puede definir a la infraestructura resiliente al clima como aquella que está planificada, diseñada, construida y operada de una manera en que se anticipan, preparan y se hacen las adaptaciones a las condiciones climáticas cambiantes actuales y futuras. También puede resistir, responder y recuperarse rápidamente de las perturbaciones causadas por estas condiciones climáticas. Por lo que, garantizar la resiliencia climática es un proceso continuo a lo largo de la vida útil del activo. Además, de que los esfuerzos para lograr la resiliencia climática pueden reforzarse mutuamente con los esfuerzos para aumentar la resiliencia ante los

peligros naturales, según lo establece la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2018).

En México, la eventual interrupción de la red de transporte ferroviario cobra mayor importancia debido a la dependencia de la economía respecto del transporte terrestre, en donde cada vez se tiene una mayor interacción entre el transporte por carretera y su complementariedad para algunas cadenas de suministro con el transporte ferroviario y multimodal.

4.1.1 Amenazas a la integridad de la infraestructura ferroviaria

Como ya se mencionó, la infraestructura de transporte ferroviario en México sufre impactos adversos por desastres naturales (por ejemplo, deslizamientos de tierra, inundaciones, incendios forestales y afectaciones por las altas temperaturas); debido a los efectos del cambio climático, habrá más afectaciones, ya que con mayor frecuencia se producirán fenómenos meteorológicos extremos (por ejemplo, huracanes, lluvias intensas y olas de calor).

Cabe mencionar que también existen otro tipo de amenazas, como aquellas que están relacionadas con actos intencionados de carácter hostil, que buscan dañar la infraestructura para interrumpir el servicio que ésta ofrece, o pueden ser involuntarias, no dirigidas o imprevistas, como las siguientes:

- Pandemias (como la ocasionada por el COVID-19).
- Incidentes relacionados con materiales peligrosos.
- Colisiones de tránsito en las carreteras y las ferrovías.
- Afectación a otros modos de transporte debido a una interrupción.
- Interferencia de las señales de telecomunicaciones por factores naturales.
- Infección a un Sistema Inteligente de Transporte a través de un *malware*.
- Bloqueos debido a demandas sociales, que además de impedir el tránsito de trenes, impide el adecuado mantenimiento de los tramos ferroviarios.

4.1.2 Identificación de la infraestructura crítica y el mejoramiento de su resiliencia

La infraestructura resiliente al clima reduce el riesgo de interrupciones relacionadas con el clima, pero el riesgo no se puede eliminar completamente. El cómo el cambio climático se traduce en riesgos para la infraestructura depende de la interacción entre las amenazas por el cambio climático con la exposición (la ubicación de los activos), la sensibilidad (estado físico que guardan los activos), los cuales conjuntamente determinan la vulnerabilidad (la propensión a verse afectado negativamente).

Los riesgos climáticos para la infraestructura nueva pueden reducirse ubicando los activos en zonas que estén menos expuestas a las amenazas climáticas (por ejemplo, evitando nuevas construcciones en planicies inundables o lejos de las líneas de costa) y mejorando la capacidad de los activos para hacer frente a la materialización de los impactos climáticos (OCDE, 2018).

Debido a que no es posible que la infraestructura ferroviaria en su totalidad sea resiliente ante todo, es recomendable que primero se determinen los tramos ferroviarios, puentes o túneles que se consideran críticos, es decir, aquellos cuyo daño afectaría en mayor medida el servicio que ofrece la red ferroviaria, con un efecto en cascada hacia la actividad económica del país, para trabajar posteriormente en el mejoramiento de esa infraestructura crítica (al menos para los riesgos de mayor probabilidad de ocurrencia o con las mayores consecuencias negativas) y, en el resto de la infraestructura, que por falta de recursos no reciba una mejora de tipo adaptativo, será necesario establecer protocolos de respuesta para cada tipo de amenaza, en busca de mejorar la resiliencia de la infraestructura a algunos de los riesgos con mayor probabilidad de ocurrencia.

Existen varias metodologías con distintos criterios (cualitativos o cuantitativos) para identificar la infraestructura crítica en el sector transporte (Gradilla, 2011), energético y de telecomunicaciones, pero dependerá de cada gobierno establecer los criterios y las mejores entre ellas, que se adapten a sus necesidades. Por ejemplo, como resultado de la pandemia por COVID-19, el Centro para la Protección de la Infraestructura Nacional del Reino Unido (CPNI, por sus siglas en inglés) clasificó otros activos de su infraestructura como críticos durante una pandemia y emitió recomendaciones para mantener seguros los activos, al personal y la información, incluyendo aspectos de seguridad cibernética para el trabajo desde casa.

Adicionalmente, en México, en el marco de la Iniciativa Global de Gestión de Riesgos de Desastres, la Agencia Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ, por sus siglas en alemán) realizó un proyecto con la Unidad de Inversiones de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) para impulsar el análisis de riesgos en las evaluaciones costo-beneficio de la infraestructura, prioritariamente las inversiones en proyectos carreteros. En coordinación con el proyecto, el Centro de Estudios para la Preparación y Evaluación Socioeconómica de Proyectos (CEPEC) emitió una guía general en 2018³ que incluye el análisis de los riesgos que puedan afectar la rentabilidad de un proyecto.

Una vez identificada la infraestructura crítica, se pueden establecer protocolos de respuesta para cada tipo de amenaza y diseñar en un futuro proyectos ferroviarios, o realizar modificaciones a la infraestructura existente, buscando mejorar la resiliencia de la infraestructura a algunos de los riesgos con mayor probabilidad de ocurrencia o con las mayores consecuencias negativas. Esto podría fortalecer la redundancia de la red entre diferentes modos de transporte.

Adicionalmente, se debe tomar en cuenta que la resiliencia climática de los activos de infraestructura individuales debe verse en el contexto del sistema como un todo. Es necesario considerar los impactos climáticos para los activos individuales, como un puente o una vía férrea, pero no es suficiente para garantizar que el sistema funcione de forma confiable ante el cambio climático. Por esta razón, los esfuerzos para garantizar la resiliencia a nivel de proyecto deben ser integrados dentro de un enfoque estratégico de planificación de la red de infraestructura, que tomen en cuenta los efectos directos e indirectos del cambio climático (OCDE, 2018).

El concepto de la resiliencia de un sistema se puede dividir en dos: dura (física) y blanda (operativa), de acuerdo con las características a las que se refiere.

La resiliencia dura está orientada a las características físicas de un sistema y podría ser medida a través de los siguientes elementos (Gradilla, 2014):

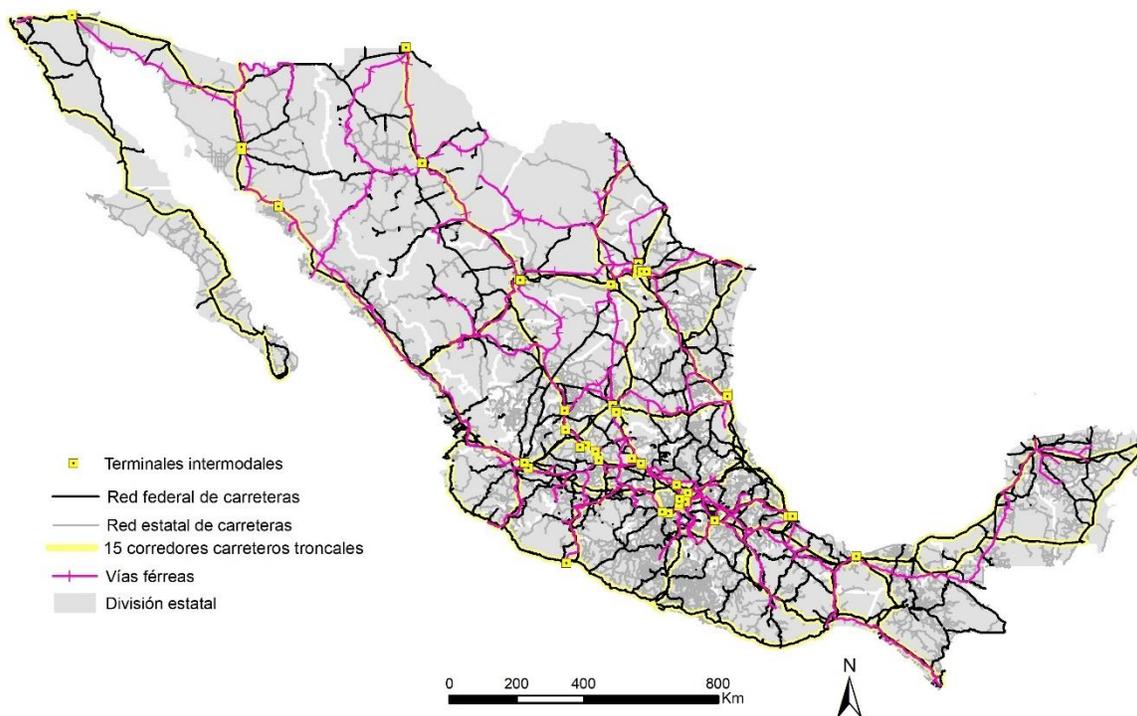
- La robustez del sistema, que tiene que ver con la fortaleza de la infraestructura y de los enlaces para mantener su nivel de servicio, a pesar de los embates del medio ambiente.

³[https://www.cepep.gob.mx/work/models/CEPEP/metodologias/documentos/Guia_General_Analisis_Costo_Beneficio_\(CEPEP\).pdf](https://www.cepep.gob.mx/work/models/CEPEP/metodologias/documentos/Guia_General_Analisis_Costo_Beneficio_(CEPEP).pdf)

- La redundancia en el sistema se da cuando ciertos recursos, instalaciones o las conexiones pueden tomar provisionalmente el lugar de los que han sido afectados, de tal forma que el sistema continúe prestando el servicio para el que fue diseñado.

También puede haber una redundancia intermodal, es decir, otro modo de transporte puede operar como un elemento complementario que, eventualmente, supla de manera parcial el servicio ofrecido por el sistema afectado.

Para el caso de México, podría existir una redundancia intermodal entre la red carretera y la red ferroviaria, al menos para cubrir los principales corredores de carga y para cierto tipo de carga (véase la Figura 4.1), aunque para lograr dicha redundancia intermodal se requiere la construcción de nuevas terminales intermodales y hacer mucho más eficientes las ya existentes.



Fuente: Gradilla (2022).

Figura 4.1 Redundancia intermodal para el transporte de carga en México

La resiliencia blanda (operativa), por otra parte, está orientada al proceso de la gestión integral de riesgos y de la respuesta ante emergencias; por lo que depende de la preparación, la coordinación y la colaboración entre organizaciones para alcanzar dos aspectos (Gradilla, 2014):

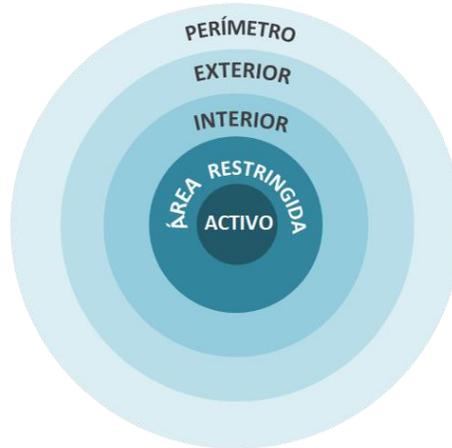
- Flexibilidad en la respuesta, que está representada a través de la comunicación en tiempo real entre departamentos de diversos sectores, incluyendo el sector transporte, y el rango amplio de organizaciones de ayuda, incluyendo la clara y precisa identificación de la evolución del riesgo, la colaboración para resolver problemas, así como la reducción sistémica del riesgo.
- Agilidad en la respuesta, que representa la reacción rápida ante un desastre a través de la movilización inmediata y precisa de recursos importantes, así como el envío de bienes de consumo adecuados para ayudar en la emergencia.

Ya se han desarrollado enfoques para evaluar la resiliencia de redes de transporte, como el marco de resiliencia desarrollado por la Agencia de Transporte de Nueva Zelanda (Hughes & Healy, 2014); el cual es aplicable en todo el sistema de transporte terrestre y permite tener en cuenta varias escalas (activo, red o región). Para medir la resiliencia, el marco se centra en dos dimensiones -técnica y organizativa- y en principios técnicos (robustez, redundancia, seguridad en caso de falla) y organizativos (preparación para el cambio, liderazgo y cultura, redes). El marco considera una determinación inicial del contexto para la evaluación de la resiliencia, seguida de una evaluación detallada de las medidas de resiliencia.

La resiliencia también puede aplicarse a la ciberseguridad para trabajar en las vulnerabilidades cibernéticas clave; con ello en la mira, se requiere que las organizaciones, gobiernos y administradores de la infraestructura piensen de manera diferente y sean más ágiles en el manejo de los ciberataques a sistemas inteligentes de transporte, centros de control de tráfico tanto carretero como ferroviario y, próximamente, a la infraestructura de transporte inteligente.

Por ejemplo, en el caso particular de un posible ataque físico a las instalaciones de un centro de control de tráfico o de túneles, la mejor medida es disuadir o dificultar el acceso a las instalaciones. Todas las otras medidas, más allá de esa línea, tienen por objeto prevenir que se cometa un acto malicioso una vez que el autor se encuentre en las instalaciones o haya tenido acceso a un activo. Se debe visualizar al activo crítico desde un punto de vista militar, con múltiples líneas de defensa o "capas de seguridad" (véase la Figura 4.2).

La infraestructura ferroviaria cuenta con centros de control del tráfico ferroviario que deben monitorear y programar el paso de los trenes, para optimizar el uso de la red, por lo que un ataque cibernético podría comprometer la seguridad de las operaciones y vulnerar el sistema ferroviario.

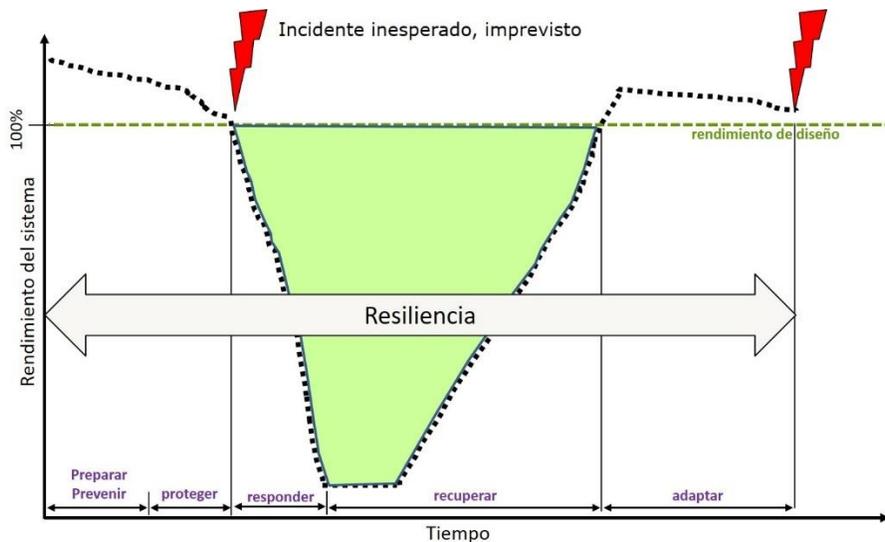


Fuente: Asociación Mundial de la Carretera [PIARC] (2019).

Figura 4.2 Capas de seguridad

La resiliencia ante desastres surge de la necesidad de promover la preparación y la prevención para reducir el impacto en la red de transporte ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores, así como también de utilizar todo el conocimiento disponible para responder y recuperar las operaciones de las redes de transporte, como la ferroviaria, de manera inmediata para reanudar el servicio que prestan los tramos ferroviarios.

La gestión de riesgos incluye acciones de preparación, prevención, protección, recuperación y respuesta postevento, así como la adaptación para gestionar la resiliencia (véanse las Figuras 4.3 y 4.4).



Fuente: PIARC (2019).

Figura 4.3 Comportamiento de un sistema con el enfoque de la resiliencia



Fuente: Edwards (2009) en PIARC (2019).

Figura 4.4 El ciclo de la resiliencia

4.1.3 Preparar

Para hacer frente a los riesgos de fenómenos naturales, se requiere conocerlos mediante su identificación en sitio, su clasificación y caracterización.

El registro debe incluir fotografías del sitio (por ejemplo, las fotos tomadas con el dispositivo móvil automáticamente registran la geolocalización del sitio mediante coordenadas), identificación del riesgo, la clasificación del riesgo, una valoración inicial, ruta ferroviaria, distrito y tramo ferroviario, cadenamamiento de inicio y terminación del riesgo, entre otros datos a determinar.

Esta base de datos será un inventario de activos ferroviarios vulnerables, sobre los cuales se pueden asignar prioridades. Los activos identificados como vulnerables requieren un análisis más detallado, incluida la recopilación de datos meteorológicos e hidrológicos mejorados y cálculos de capacidad, etc.

4.1.4 Prevenir

En esta fase del proyecto se busca determinar un catálogo de las amenazas y peligros que ponen en riesgo la integridad física de la red de ferroviaria y sus operaciones.

La integración de peligros y amenazas se puede construir con base en el sistema de información sobre riesgos del Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED). Las capas de información serán útiles para definir las regiones del país con alta susceptibilidad a los diversos riesgos.

Estos mapas serán utilidad para el establecimiento de las zonas, en donde se deba tener una mayor capacidad de respuesta por parte de los concesionarios del Sistema Ferroviario Mexicano para la atención de emergencias.

La prevención implicará crear capacidades para hacer frente a las amenazas, conformando planes locales de acción, coordinando actores involucrados, etc.

4.1.5 Proteger

Una de las principales acciones que las organizaciones deben tener previo a la ocurrencia de un desastre, es la de proteger a los usuarios del sistema ferroviario, para ello es importante proporcionarles información oportuna acerca de las condiciones operativas de la red férrea mediante los sistemas de información meteorológica.

Estos sistemas permiten fusionar las tecnologías actuales en el análisis meteorológico, el pronóstico del tiempo, las telecomunicaciones y el monitoreo de las condiciones de la vía, para producir información y pronósticos a corto plazo en sitios específicos, conjuntamente con un método de diseminación rápido y oportuno para los usuarios sistema ferroviario mexicano.

4.1.6 Responder

Responder implica tomar acción durante y, de manera inmediata, después de que un desastre ocurre. La atención de la emergencia se enfoca en salvaguardar la vida de las personas y en minimizar el daño a la infraestructura, así como en eliminar la interrupción de la operación ferroviaria.

La atención de emergencias es una labor coordinada entre las diferentes autoridades, desde la municipal hasta la federal, sin embargo, cada sector debe, en su alcance, contar con herramientas y procedimientos que permitan restablecer el servicio.

4.1.7 Recuperar

La recuperación implica la reconstrucción y la restauración de la infraestructura afectada, en un plazo corto de tiempo generalmente.

En esta fase es importante documentar las prácticas actuales para la recuperación de la infraestructura, incluyendo recursos (fondos disponibles), responsabilidades y procedimientos para la gestión.

4.1.8 Adaptar

La adaptación, que significa tomar medidas para aumentar la resiliencia y minimizar los costos de recuperación, es una actividad esencial para la prevención ante de desastres.

Las estrategias de adaptación en el sector de transporte pueden clasificarse de acuerdo con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2013) en tres categorías principales:

- a) Las que se dirigen a identificar los riesgos y vulnerabilidades.
- b) Las que procuran proteger y fortalecer la infraestructura vulnerable.
- c) Las que tienen por objetivo crear otras vías para mejorar la resiliencia del sistema de transporte.

4.2 Medidas de adaptación al clima

Como ya se mencionó, la adaptación al clima es el proceso de adaptación al clima actual, o esperado, y sus efectos (IPCC, 2014). La adaptación de la infraestructura ferroviaria implica acciones (políticas, estrategias, ingeniería o basadas en la naturaleza) que permitirán que la infraestructura permanezca operando bajo la presencia de fenómenos climáticos extremos y sus efectos derivados, sin que resulten en fallas/daños que repercutan en cierres parciales o totales de la vía férrea.

Las medidas de adaptación deben ser específicas para cada país y región, ya que estas varían en función del tipo de amenaza y de sus características.

Existen diversos tipos de medidas de adaptación, que se pueden clasificar en dos tipos:

- Medidas estructurales: métodos para construir resiliencia, mejoramiento de infraestructura existente, actualización normativa, etc. (Thoma, 2014), por ejemplo, cambiar el diseño de la infraestructura y utilizar materiales con un mejor comportamiento ante las condiciones climáticas. Los enfoques basados en ecosistemas que utilizan infraestructura natural para diseñar

medidas de adaptación también son alternativas clave que deben considerarse junto con las medidas de adaptación estructural (OCDE, 2018).

- Medidas no estructurales o de gestión: aspectos geográficos, sistemas de información, sistemas de alerta temprana, seguros, impuestos, etc. (Thoma, 2014), por ejemplo, invertir en sistemas de alerta temprana o comprar seguros para abordar las consecuencias financieras de la variabilidad climática. Estas medidas también pueden incluir un mejor monitoreo de los activos existentes para reducir el riesgo de falla a medida que cambian las condiciones climáticas. Los enfoques de gestión adaptativa también incluyen disposiciones para incluir flexibilidad desde el principio para monitorear y adaptarse a las circunstancias cambiantes a lo largo de la vida útil de los activos (OCDE, 2018).

4.2.1 Estrategias de adaptación de la infraestructura ferroviaria al cambio climático

Algunos esfuerzos identificados en la literatura internacional se describen a continuación:

- Incorporar proyecciones de cambio climático en el diseño y el cálculo de la capacidad para las obras de drenaje, de tal manera que puedan hacer frente a los cambios en la frecuencia y magnitud de inundaciones futuras proyectadas.
- Mejorar las prácticas de mantenimiento y monitoreo de las vías férreas para detectar cualquier variación debido a las temperaturas o la precipitación, y con ello evitar un posible descarrilamiento.
- Implementar mecanismos para predecir y monitorear las temperaturas de la vía férrea, para un manejo correcto de las tensiones en los rieles, incluso establecer límites de velocidad bajo condiciones de temperaturas altas para reducir esfuerzos.
- Utilizar materiales con un mejor comportamiento ante las condiciones climáticas, por ejemplo: el comportamiento con respecto a la temperatura de los elementos de sujeción del riel con el durmiente (cojinete, tornillo, resortes, etc.), o el comportamiento del balasto y sub-balasto ante las condiciones de precipitación y humedad. Para reducir la expansión térmica del riel, por altas temperaturas, se pueden utilizar revestimientos de baja absorción solar, un ejemplo es mostrado en la Figura 4.5.
- Monitorear la tasa de socavación tanto de pilas como de estribos en los puentes y, en general, el comportamiento hidráulico y estructural. La medida más común para proteger estos elementos

es la construcción de escolleras para proteger las zapatas y los pilares.

- Políticas organizacionales que coadyuven a la mejora en la gestión de activos y la actualización de las normas técnicas de diseño de infraestructura ferroviaria.



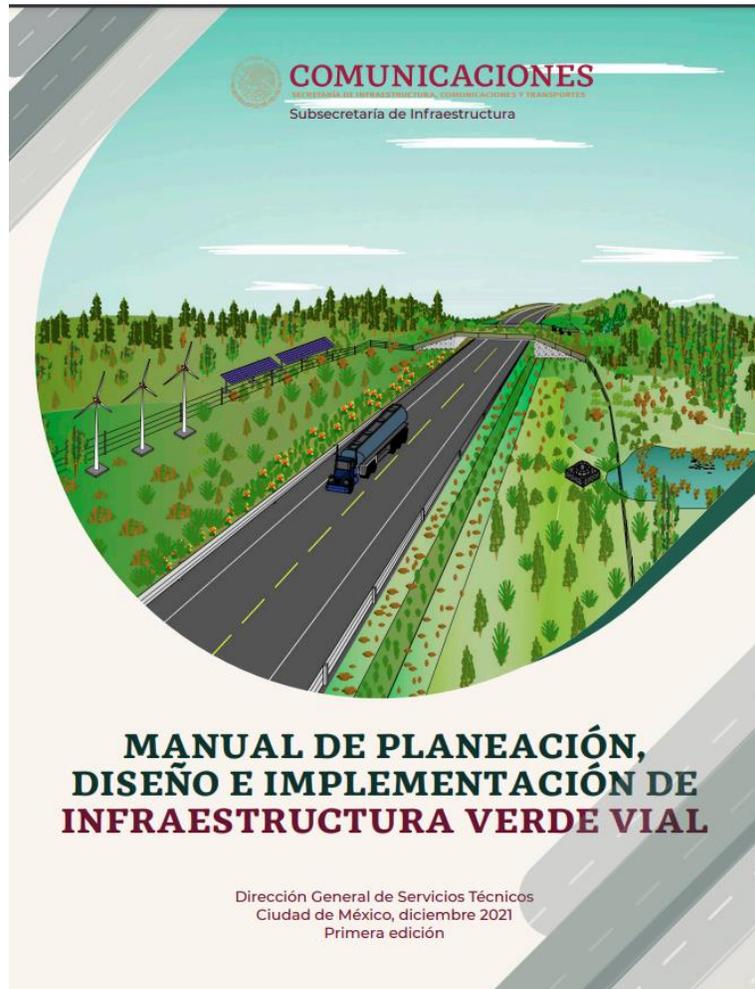
Fuente: U.S. Department of Transportation (2018) y Deutsche Bahn⁴

Figura 4.5 Ejemplos de la utilización del recubrimiento blanco en rieles

⁴ <https://www.railway-technology.com/features/solution-to-overheated-rail-tracks/?cf-view>

- Realizar evaluaciones de vulnerabilidad y cartografía a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) de los territorios en riesgo de derrumbes, desprendimientos y otros peligros naturales.
- En algunos puentes ferroviarios se pueden instalar sensores de viento, lo que permite a los operadores ferroviarios ajustar la velocidad o retrasar el paso.
- Implementar sistemas de información meteorológica para advertir con antelación la formación de tormentas que reduzcan la visibilidad y la estabilidad del tren, precipitación intensa que pueda provocar inundaciones, bajas temperaturas que pueden congelar las vías, etc.; que permitan al operador ferroviario tomar decisiones, tales como disminuir la velocidad o detener el servicio.
- Planificación de rutas de emergencia o desvíos, si existen, en caso de obstrucción de algún tramo ferroviario. En caso de que no se tenga dicha infraestructura, sugerir la construcción de tramos redundantes para corredores con alta demanda de carga, y en un futuro, de pasajeros.
- Para proyectos nuevos de ingeniería, construcción y desarrollo ferroviario, se debe tener en cuenta la experiencia y los conocimientos disponibles para la reducción del riesgo al cambio climático mediante la adaptación del proyecto ferroviario.
- Monitorear los sitios de desvío ferroviario (sitios críticos por los cambios en la dirección del tren), los cuales son particularmente vulnerables al impacto emergente por el clima.
- Gestión de taludes (corte y terraplén) mediante su restauración y conservación para garantizar su estabilidad. Se recomienda el uso de geotextiles, así como de técnicas de bioingeniería para su estabilización, incluyendo muros verdes. En general, se recomiendan medidas de protección estructural combinadas con sistemas de evaluación de la vulnerabilidad y reducción del riesgo de desastres. Dado que la aplicación de medidas estructurales para todo el sistema ferroviario no es factible, tanto por razones económicas como por aspectos de protección de la naturaleza y el paisaje, se deben incorporar medidas adicionales (no estructurales) de reducción de riesgos, como la provisión de sistemas de alerta temprana, redireccionamiento del tráfico, etc.
- Gestión de la vegetación dentro de la zona del derecho vía y aledaña a la vía férrea para evitar elementos caídos y, por otro lado, conservar aquella que permita estabilizar el suelo y controlar escurrimientos. Por lo que se recomiendan medidas basadas en ecosistemas que aumenten la resiliencia al viento, por ejemplo, árboles capaces de soportar altas velocidades de viento. La SICT cuenta con un Manual publicado en el año 2021 que se ilustra en la Figura 4.6.

- Control de la erosión y socavación de la subestructura y la superestructura de la vía férrea en zonas costeras o junto a ríos.



Fuente: SICT⁵ (2021).

Figura 4.6 Portada del Manual de Infraestructura verde vial

Las medidas de adaptación mostradas son de aplicabilidad general, y son las más comunes para todos los países, sin embargo, estas deben ser adecuadas para cada región en lo particular, considerando tanto los

5

https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_de_Planeacion/Manual_Infraestructura_Verde_Vial.pdf

registros e impactos climáticos históricos como los escenarios climáticos futuros.

Adicionalmente, se deben desarrollar estrategias que minimicen el impacto de las fallas operativas causadas por condiciones climáticas extremas.

4.2.2 Gestión del riesgo

El mejoramiento de la resiliencia al clima de la infraestructura ferroviaria debe estar a su vez inmerso en una estrategia de gestión de riesgos, en donde se implementen medidas de adaptación estructurales y no estructurales. Ya que, la gestión de riesgos es el proceso general que permite fortalecer las capacidades para hacer frente a cualquier desastre futuro, y aumentar la resiliencia de la red ferroviaria. La atención de los riesgos del cambio climático es esencial dentro del proceso de adaptación al cambio climático.

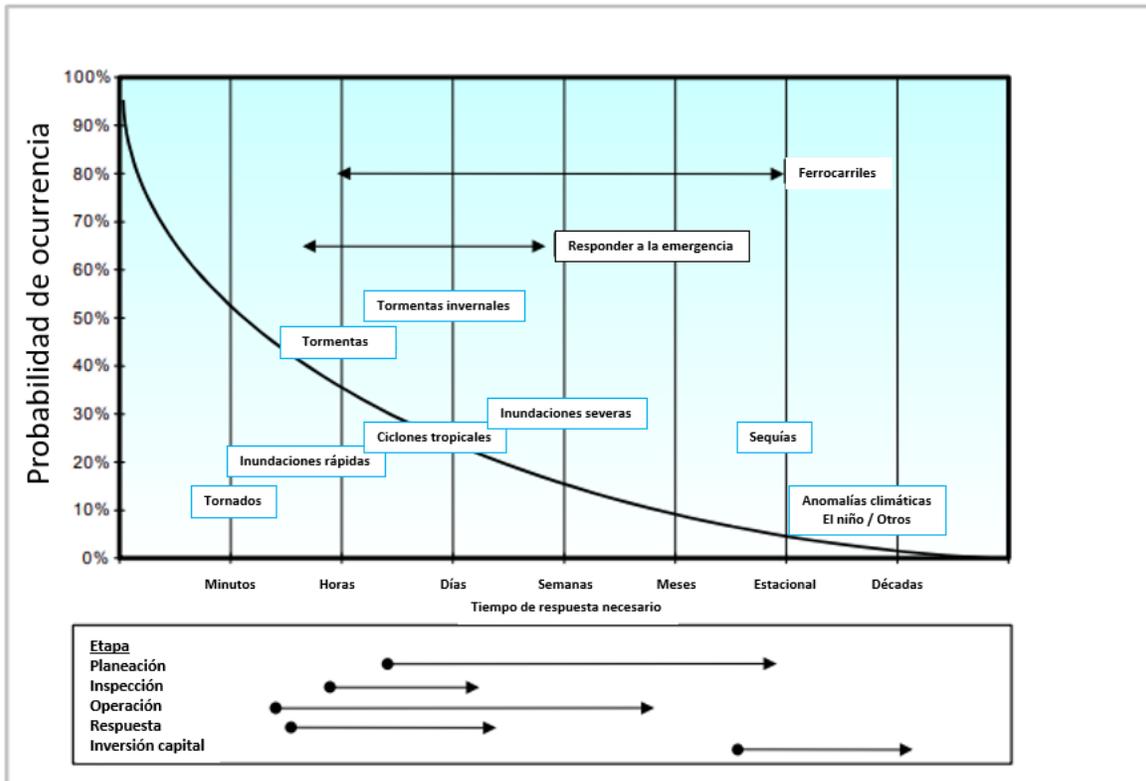
La gestión de riesgos requiere hacer un balance entre la minimización del riesgo y los costos; ya que, desde el punto de vista técnico, cada vez es más caro y desafiante prepararse para acontecimientos que es muy poco probable que ocurran. Resiliencia significa que se han considerado y gestionado los riesgos para alcanzar un nivel aceptable de desempeño dada la información disponible, y que se dispone de las capacidades para resistir y recuperarse de las perturbaciones. Es necesario sopesar los costos de la protección frente a las consecuencias de los daños o interrupciones del servicio. En el caso de infraestructuras de protección (como las defensas contra inundaciones), serán los activos protegidos por las defensas. En el caso de otras infraestructuras, serán los costos derivados de los daños o interrupciones provocadas en el activo, debido al servicio que deja de proveer dicha infraestructura (OCDE, 2018).

4.2.3 Atención de emergencias

La atención de emergencias también es un aspecto fundamental para la resiliencia de la red ferroviaria, particularmente tratándose de impactos climáticos.

Cada una de las amenazas climáticas demandará un tiempo de respuesta diferente, sobre el cual los organismos responsables deberán actuar para responder a la emergencia y recuperarse. La Figura 4.7 muestra un esquema para determinar los tiempos para atender los daños en la infraestructura ferroviaria que podrían ocasionar los diferentes fenómenos climáticos, en función de una probabilidad hipotética de que estos puedan ocurrir. Este ejemplo puede ser adaptado para cada país en

función del conocimiento local y de las autoridades para diseñar un plan estratégico para la adaptación al cambio climático y la gestión de riesgos de desastres en la infraestructura ferroviaria.



Fuente: Rosetti (2008).

Figura 4.7 Marco para responder a emergencias en la infraestructura ferroviaria

4.3 Información climática necesaria para definir medidas de adaptación

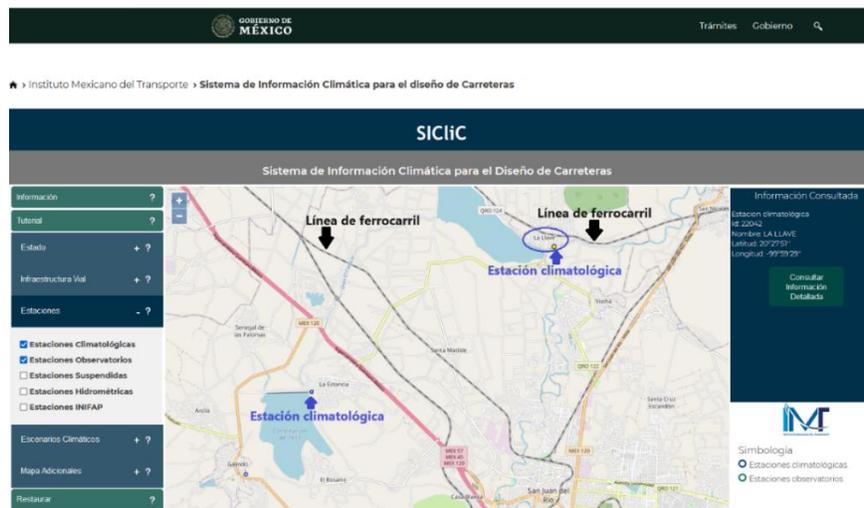
Actualmente, en México, la Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario cuenta con la Red Ferroviaria Nacional (RFN), conformada por cinco capas geográficas que describen la infraestructura ferroviaria en cuanto a vías, túneles, cruces a nivel, puentes, patios, terminales, estaciones de pasajeros, puertos ferroviarios marítimos y fronterizos, así como placas kilométricas. En total, se cuenta con una red georreferenciada de 21,755 km de vías ferroviarias, asignadas o remanentes. Dicho inventario representa la información básica necesaria para realizar el análisis geoespacial.

Por otra parte, las alteraciones de los promedios climáticos regionales van acompañadas de cambios en la frecuencia e intensidad de los fenómenos extremos, tales como inundaciones, fuertes marejadas, tormentas severas

o temperaturas extremas. Por lo que, uno de los grandes desafíos para los planificadores de infraestructura de transporte y para los encargados tanto de su mantenimiento como de su posible adaptación al cambio climático, es encontrar información climática tanto del pasado como de los escenarios futuros; ya que no basta con tomar en cuenta datos históricos, ahora es necesario contar con los escenarios futuros del cambio climático para un futuro cercano y a largo plazo.

Al respecto, en el Instituto Mexicano del Transporte se desarrolló el Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras (SICliC)⁶, en donde es posible acceder a la información climática histórica de distintas estaciones meteorológicas y observatorios del país, así como a algunos de los escenarios de cambio climático estimados para México (Mendoza *et al.*, 2021).

Como su nombre lo indica, el SICliC está enfocado a la infraestructura carretera, por lo que actualmente no cuenta con las capas de la Red Ferroviaria Nacional, sin embargo, dicha herramienta tiene el mapa base de *OpenStreetMap*⁷, lo que permite identificar la red ferroviaria y, por lo tanto, puede ser útil para visualizar geoespacialmente los datos climáticos históricos (véase la Figura 4.8), así como cambios climáticos esperados en ciertas regiones para determinadas ferrovías o estaciones ya existentes.



Fuente: <http://siclic.imt.mx/SICLIC/>

Figura 4.8 Ejemplo de estaciones climatológicas cercanas a las líneas de ferrocarril en el SICliC

⁶ <http://siclic.imt.mx/SICLIC/>

⁷ <https://www.openstreetmap.org>

Además, en el Portal de Conocimientos sobre Cambio Climático (CCKP)⁸, que desarrolló el Banco Mundial, se puede acceder a la información climática histórica y proyectada para 130 países, en donde se incluye a México⁹; es decir, la plataforma permite visualizar los efectos de los cambios en los patrones de temperatura y precipitación, así como la situación general que enfrenta México debido al cambio climático.

También son de gran utilidad las Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (Curvas IDF), que son una relación matemática entre la intensidad de una precipitación, su duración y la frecuencia con la que se observa. Es decir, se pueden identificar lluvias intensas de corta duración o lluvias moderadas de larga duración, que tienen distintos efectos sobre los caminos; por ejemplo, una curva IDF-5 días mide tormentas prolongadas. Una vez que se tienen dichas curvas se puede estimar si tendrían o no variación bajo distintos escenarios de cambio climático, en las zonas geográficas donde se está construyendo, mejorando o rehabilitando una ferrocarril, ya que en la actualidad la influencia del cambio climático en las lluvias altera la curvas IDF para alguna zona donde se deseen diseñar obras hidráulicas.

Adicionalmente, es importante obtener datos espaciales de los eventos históricos, por ejemplo, de eventos hidrometeorológicos, así como los daños que sufrieron las ferrocarriles bajo dichos eventos, especificando la parte de la infraestructura ferroviaria que se dañó. En la medida de lo posible, sería útil contar con la evaluación *in situ*, de algunos de los elementos de la infraestructura que soportaron bien los impactos de dichos eventos, es decir, que los umbrales de diseño actuales permitieron cierta resiliencia en el elemento de la ferrocarril, sobre todo cuando se trata de infraestructura estratégica.

Conforme se tenga información más detallada y datos espaciales a mayor escala, se podrán hacer mejores estimaciones de las variaciones futuras del clima y desarrollar mejores medidas de adaptación.

Finalmente, es importante identificar la normativa técnica de diseño del país y el estado de actualización que guarda y, en su caso, actualizarla de acuerdo a estándares que consideren el cambio climático.

⁸ The Climate Change Knowledge Portal (CCKP): <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>

⁹ <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/mexico>

Conclusiones

Los impactos del cambio climático en la infraestructura ferroviaria y en las operaciones son cada vez más frecuentes y, en el futuro, estos continuarán incrementándose de acuerdo con los escenarios del cambio climático futuros y su efecto en los eventos climáticos extremos (huracanes, lluvias, etc.), que son más frecuentes e intensos.

Esto implicará, para el país, iniciar trabajos para identificar y evaluar las amenazas que el cambio climático representa para la infraestructura ferroviaria y su operación; por lo que, los análisis realizados en esta investigación contribuirán con conocimiento para estimar el grado de exposición ante diferentes amenazas climáticas que tiene y que tendrá el sistema ferroviario mexicano.

Una vez identificada la infraestructura vulnerable, será primordial el desarrollo de estrategias y medidas de adaptación al cambio climático, que permitan evitar cualquier daño significativo en las vías férreas y asegurar la resiliencia de la red ferroviaria, para reducir impactos en las cadenas logísticas por los retrasos o cancelaciones del servicio.

La adaptación es, sin duda, la herramienta más efectiva para reducir la vulnerabilidad de la infraestructura ferroviaria, por lo que se debe asegurar una selección correcta de las medidas, ya sean soluciones basadas en la ingeniería que garanticen la estabilidad y la integridad de las vías férreas y sus instalaciones, o de alternativas basadas en la naturaleza o verdes (adaptación basada en ecosistemas), las cuales permiten de una forma más sostenible abordar los retos de la adaptación mediante la restauración de ecosistemas, entre otros.

Es fundamental continuar estudiando los efectos del cambio climático a largo plazo, así como de los riesgos asociados por el aumento de la frecuencia de diversos fenómenos meteorológicos extremos, que continuarán impactando a la red ferroviaria, así como trabajar en la reducción de la incertidumbre de los pronósticos climáticos.

En México, se requiere una estrategia vinculante entre la autoridad ferroviaria y las empresas concesionarias del servicio ferroviario, para construir conjuntamente el mejor camino que permita aumentar la resiliencia en la infraestructura ferroviaria.

El concepto de resiliencia y la forma en que puede definirse, medirse y mejorarse en todo el sistema de transporte ferroviario puede ayudar a garantizar que la infraestructura ferroviaria funcione de forma continua y segura la mayor parte del año. Para ello se requiere un cambio cultural, de tal manera que los gestores de la infraestructura incorporen dicho enfoque en las operaciones diarias de la infraestructura actual, es decir, que se tomen en cuenta elementos duros y blandos para mejorar la resiliencia en las fases de prevención y protección, así como en las de recuperación y adaptación después de algún evento perturbador. Y para el caso de la infraestructura futura, será cada vez más necesario incorporar, en la fase de planeación, aquellos elementos que ayudan a aumentar la resiliencia de la infraestructura de transporte ferroviario, tanto en el aspecto físico como en el cibernético, ante nuevas amenazas como el cambio climático y los retos que se enfrentarán con la infraestructura de transporte inteligente.

Se espera que esta investigación proporcione bases conceptuales y metodológicas para encaminar un proceso de adaptación y gestión de riesgos en la infraestructura ferroviaria existente en el país, mediante los cuales se pueda construir resiliencia y/o establecer mecanismos para responder rápidamente ante las emergencias y minimizar el impacto en las cadenas logísticas.

En la medida que el conocimiento aumente, se podrán identificar y ampliar mejores prácticas para la adaptación al cambio climático de los sistemas ferroviarios y los elementos que los integran, sobre todo por el impulso actual para ofrecer una mayor cobertura de transporte mediante el uso del ferrocarril.

Bibliografía

- Asociación Mundial de Carreteras [PIARC]. (2015). *Marco Internacional de Adaptación de la Infraestructura Carretera al Cambio Climático*. Francia: PIARC.
- Asociación Mundial de la Carretera [PIARC]. (2019). *Security of Road Infrastructure*. Informe del Grupo de Estudio “Seguridad de la Infraestructura”. Francia: PIARC.
- Asociación Mundial de Carreteras [PIARC]. (2023). *Marco Internacional de Adaptación de la Infraestructura Carretera al Cambio Climático*. Francia: PIARC.
- Administrador de Infraestructuras Ferroviarias [ADIF]. Diccionario ferroviario. [Consulta en línea]. <https://www.adif.es/comunicacion-prensa/diccionario-ferroviario>.
- Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario [ARTF]. (2020). *Atlas del Sistema Ferroviario Mexicano*. [Consulta en línea]. <https://www.gob.mx/artf/documentos/mapas-del-sistema-ferroviario-mexicano>
- Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario [ARTF]. (2023). *Reporte de Seguridad en el Sistema Ferroviario Mexicano*. [Consulta en línea]. <https://www.gob.mx/artf/documentos/reporte-de-seguridad-en-el-sistema-ferroviario-mexicano-tercer-trimestre-2022>
- Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario [ARTF] (2023). *Atlas del sistema ferroviario mexicano*. México. [Consulta en línea]. <http://artf.centrogeo.org.mx/mviewer/sfm>
- Andersson, E.; Häggström, J.; Sima, M. y Stichel, S. (2004). Assessment of train-overturning risk due to strong cross-winds. Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit, 218(3), pp. 213–223. <https://doi.org/10.1243/0954409042389382>
- Baker, C.; Jones, J.; López, F. y Munday, J. (2004). Measurements of the cross wind forces on trains. Aerodyn, 92 (7-8), pp. 547–563. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.03.002>

- Baker, C.; Chapman, L.; Quinn, A. y Dobney, K. (2009). Climate change and the railway industry: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 224 (3), pp. 519-528.
<https://doi.org/10.1243/09544062JMES1558>
- Banco Interamericano de Desarrollo [BID]. (2013). *Integración de la Gestión de Riesgo de Desastres y la Adaptación al Cambio Climático en la Inversión Pública*. Estados Unidos de Norteamérica: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Blackwood, L.; Renaud, F. y Gillespie, S. (2022). Nature-based solutions as climate change adaptation measures for rail infrastructure. *Nature-Based Solutions*, Vol. 2, pp. 1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100013>
- Davies, H., Frandsen, M., y Hockridge, B. (2014). *NEWP 32 Transport green corridors: literature review, options appraisal and opportunity mapping*. United Kingdom: University of Southampton.
- Diedrichs, B., Sima, M., Orellano, A., y Tengstrand, H. (2007). Crosswind stability of a high-speed train on a high embankment. *Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit*, 221(2), pp. 205–225.
<https://doi.org/10.1243/0954409JRRT126>
- Dindar, S.; Kaewunruena, S. y Sussman, J. (2017). Climate Change Adaptation for GeoRisks Mitigation of Railway Turnout Systems. *Procedia Engineering*, 189, pp. 199-206.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.032>
- Edwards, C. (2009). *Resilient Nation*. UK: Demos.
- Ferrocarriles de México [Ferromex]. (2015). *Especificaciones técnicas para la construcción y ampliación de vías particulares*. Documento No. 3. Dirección de mantenimiento y recursos operativos. México: Ferromex.
- Gradilla, L. (2011). *Planeación de infraestructura del transporte: identificación de tramos críticos para el funcionamiento de redes carreteras*. [Publicación Técnica No. 354]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF].
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt354.pdf>
- Gradilla, L. (2014). *Transporte federal de personas en México: transición hacia la sustentabilidad y la resiliencia*. [Publicación Técnica No. 401]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF].
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt401.pdf>

- Gradilla, L.; Mendoza, J.; Orantes, H. y Marcos, O. (2018). *Aproximación geoespacial para la adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera en México*. [Publicación Técnica No. 523]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt523.pdf>
- Gradilla, L. (2022). Resiliencia de la infraestructura del transporte terrestre. *Revista IC Ingeniería Civil*, año LXXII, número 628. México: Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C.
- Gradilla, L.; Mendoza, J.; García, A. y Balbuena, J. (2022). *Consideraciones para la adaptación ante el cambio climático de los caminos rurales y alimentadores*. [Publicación Técnica No. 713]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt713.pdf>
- Grupo LET. *Rieles Ferroviarios*. [Consulta en línea]. <https://let.com.mx/376-2/>
- Hughes, J. y Healy, K. (2014). *Measuring the resilience of transport infrastructure*. Reporte de investigación 546. Nueva Zelanda: NZ Transport Agency.
- Insa, R.; Salvador, P.; Martínez, P.; Villalba, I. y García, C. (2015). Una introducción al ferrocarril. *Elementos constituyentes de la superestructura (Vol. 1)*. España: Universitat Politècnica de València.
- Jefatura de la Oficina de la Presidencia de la República [JOP] (2019). *Estrategia nacional para la implementación de la Agenda 2030 en México*. México: Jefatura de la Oficina de la Presidencia de la República.
- Kostianaia, E.; Kostianoy, A.; Scheglov, M; Karelov, A. y Vasileisky, A. (2021). Impact of regional climate change on the infrastructure and operability of railway transport. *Transport and Telecommunication*, 2021, 22 (2), pp.183–195. <https://doi.org/10.2478/ttj-2021-0014>
- Lavell, A.; Oppenheimer, M.; Diop, C.; Hess, J.; Lempert, R.; Li, J. y Myeong, S. (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 25-64. England: Cambridge University Press.

- Manson, S. (2001). Simplifying complexity: a review of complexity theory. *Geoforum* 32 (3), pp. 405-14. [https://doi.org/10.1016/S0016-7185\(00\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7185(00)00035-X)
- Marteaux, O. (2016). *Tomorrow's railway and climate change adaptation: Executive report*. UK: Rail Safety and Standards Board Limited.
- Mendoza, J. y Marcos, O. (2017). *Panorama internacional de la adaptación de la infraestructura carretera ante el cambio climático*. [Publicación Técnica No. 488]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF].
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt488.pdf>
- Mendoza, J.; Marcos, O. y Orantes, H. (2019). *Marco metodológico para la adaptación de la infraestructura carretera ante el cambio climático en México*. [Publicación Técnica No. 557]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF].
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt557.pdf>
- Mendoza, J.; Adame, E.; Gradilla, L. y Marcos, O. (2021). *Sistema de Información Climática para el Diseño de Infraestructura Carretera*. [Publicación Técnica No. 636]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF].
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt636.pdf>
- National Rail (2023). *How can heavy rainfall impact the railway?* United Kingdom: National Rail. [Consulta en línea].
<https://www.nationalrail.co.uk/rain/> [
- Network Rail (2023). *Soil Moisture Deficit on the railway*. United Kingdom: Network Rail. [Consulta en línea].
<https://www.networkrail.co.uk/stories/soil-moisture-deficit-on-the-railway/>
- Nolte, R., Kamburow, C., y Rupp, J. (2011). *Adaptation of Railway Infrastructure to Climate Change*. [Consulta en línea].
<http://www.ariscc.org/>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU] (2023). *Objetivos de desarrollo sostenible*. [Consulta en línea].
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE] (2018). *Climate-resilient infrastructure*. Policy Paper No. 14. Francia: OCDE.

- Palin, E.; Thornton, H.; Mathison, C.; McCarthy, R.; Clark, R. y Dora, J. (2013). Future projections of temperature-related climate change impacts on the railway network of Great Britain. *Climatic Change*, 120, pp. 71-93. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0810-8>
- Palko, K. y Lemmen, D. (2017). *Climate risks and adaptation practices for the Canadian transportation sector 2016*. Canadá: Government of Canada.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC] (2000). *Special Report on Emissions Scenarios*. A special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC]. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and USA: Cambridge University Press.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC] (2014). *Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5). United Kingdom and USA: Cambridge University Press.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC] (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribución del Grupo de Trabajo I (bases físicas del clima) al sexto informe de evaluación "AR6" del IPCC. United Kingdom and USA: Cambridge University Press.
- Rachoy, C. y Spazierer, M. (2008). *Meteorological information and warning system for railway infrastructure decision support for natural hazards management*. In: Proceedings of the World Congress on Rail Research, Seoul, Korea.
- Real Academia Española (RAE). *Diccionario de la lengua española. Actualización 2023*. [Consulta en línea]. <https://dle.rae.es/>
- Rossetti, M. (2008). *Impacts of Climate Change on Railroads. Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation*. TRB Special Report 290. USA: Transportation Research Board.
- Rübbelke, D. (2011). International support of climate change policies in developing countries: strategic, moral and fairness aspects.

Ecological Economics, 70 (8), pp. 1470–1480.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.03.007>

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT]. (2022). [Consulta en línea]. <https://www.gob.mx/sct/prensa/>

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT]. (2023). *Principales estadísticas del sector infraestructura, comunicaciones y transportes 2022*. México: Dirección General de Planeación, SICT.

Stenström, C.; Famurewa, S.; Parida, A. y Galar, D. (2012). *Impact of cold climate on failures in railway infrastructure*. In International Conference on Maintenance Performance Measurement & Management. United Kingdom: University of Sunderland.

Szymczak, S.; Backendorf, F.; Blauhut, V.; Bott, F.; Fricke, K.; Herrmann, C.; Klippel, L. y Walter, A. (2023). Heat and Drought Induced Impacts on the German Railway Network. *Transportation Research Procedia*, 72, pp. 696-703. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.457>

Thoma, K. (2014). *Resilience by Design: a strategy for the technology issues of the future*. Acatech Study. Alemania: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.

U.S. Department of Transportation. (2018). *Low Solar Absorption Coating for Reducing Rail Temperature and Preventing Buckling*. USA: Federal Railroad Administration.

United Nations Economic Commission for Europe [UNECE]. (2013). *Climate Change Impacts and Adaptation for International Transport Networks*. Expert Group Report. Switzerland: UNECE.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
San Fandila, Pedro Escobedo
C.P. 76703
Querétaro, México
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

publicaciones@imt.mx

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