



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Consideraciones para la adaptación ante el cambio climático de los caminos rurales y alimentadores

Luz Angélica Gradilla Hernández
Juan Fernando Mendoza Sánchez
Alonso García Roa
José Alfonso Balbuena Cruz

Publicación Técnica No. 713
Querétaro, México.
2022

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, el Mtro. Juan Fernando Mendoza Sánchez y el Ing. Alonso García Roa, así como por el Mtro. José Alfonso Balbuena Cruz, de la Coordinación de Transporte Integrado y Logística.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna MI-01/22 “Consideraciones para la adaptación ante el cambio climático de los caminos rurales y alimentadores”.

Tabla de Contenido

	Página
Sinopsis.....	v
Abstract.....	vii
Introducción.....	1
1. Los caminos rurales y alimentadores ante el cambio climático.....	3
1.1 Los caminos rurales y alimentadores en México.....	3
1.2 Escenarios de cambio climático.....	7
1.3 Información necesaria para definir medidas de adaptación.....	8
1.4 Posibles criterios de priorización.....	10
1.4.1 Corredores locales de transporte.....	11
1.4.2 Corredores agropecuarios o turísticos.....	11
1.4.3 Zonas de atención prioritaria en México.....	11
1.4.4 Redundancia para atención de emergencias.....	14
2. Consideraciones técnicas.....	15
2.1 Condición de los caminos rurales y alimentadores en México.....	15
2.2 Elementos de la infraestructura.....	16
2.3 Agrupación de los elementos de la infraestructura carretera.....	18
2.3.1 Talud de corte.....	21
2.3.2 Cunetas.....	24
2.3.3 Acotamientos.....	27
2.3.4 Superficie de rodadura.....	28
2.3.5 Base.....	30
2.3.6 Sub-base.....	34

2.3.7	Terracerías	35
2.3.8	Terraplén.....	37
3.	Consideraciones socio-organizativas para la adaptación	39
3.1	El concepto de las misiones	39
3.2	Adaptación basada en comunidades.....	42
3.2.1	Intervención de las comunidades en pequeños proyectos de rehabilitación de caminos	44
4.	Marco para la adaptación de caminos rurales y alimentadores.....	47
4.1	Identificación de riesgos	48
4.2	Evaluación de la vulnerabilidad	49
4.3	Análisis del riesgo.....	50
4.4	Determinación de las medidas de adaptación.....	50
4.5	Priorización de las medidas de adaptación	51
4.6	Implementación y monitoreo	51
	Conclusiones.....	52
	Bibliografía	54

Sinopsis

En la presente publicación se establecen algunas consideraciones tanto técnicas como socio-organizativas que podrían ser de utilidad en el proceso de adaptación ante el cambio climático de los caminos alimentadores en México, así como algunas referencias para el mejoramiento de los caminos rurales.

Se destacan los desafíos a los que se enfrentan los planificadores de infraestructura de transporte, ya que no solo deben contar con información climática histórica y de los escenarios futuros del cambio climático sino también con datos espaciales que les permitan identificar posibles zonas de riesgo al cambio climático para priorizar tramos a ser intervenidos, o para nuevas obras que contemplen criterios de adaptación al cambio climático en su diseño.

La investigación también hace énfasis en la necesidad de involucrar a las comunidades y diversos actores en el proceso de adaptación para que las acciones permeen en el ámbito local y sean sostenibles, para ello se puede diseñar una misión que permita la definición de estudios piloto en distintas zonas geográficas del país, para definir medidas de adaptación mucho más específicas y generar los mecanismos necesarios para la capacitación. Finalmente, se sugiere un marco general para hacer frente a los impactos del cambio climático en la infraestructura carretera.

Abstract

This publication establishes some technical and socio-organizational considerations that could be useful in the process of adaptation to climate change of secondary roads in Mexico, as well as some references for the improvement of rural roads.

The challenges faced by transport infrastructure planners are highlighted, since they must not only have historical climate information and future climate change scenarios, but also spatial data that allows them to identify potential climate change risk areas and prioritize sections to be intervened, or to include climate change adaptation criteria in the new infrastructure design.

The research also emphasizes the need to involve communities and various stakeholders in the adaptation process so that the actions permeate locally and are sustainable; for this, a mission can be designed to develop pilot studies in different geographical areas of the country, to define much more specific adaptation measures and generate the necessary mechanisms for training. Finally, a general framework is suggested to deal with the impacts of climate change on road infrastructure.

Introducción

Las sociedades pueden responder al cambio climático adaptándose a sus impactos y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero; por tanto, la política pública 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, misma que 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. El objetivo 9 consiste en construir infraestructuras resilientes, incluyendo la infraestructura de transporte, así como promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación (JOP, 2019).

En 2021, México contaba con una red nacional de carreteras de 401,366 kilómetros de los cuales 130,494 kilómetros correspondían a caminos alimentadores y 161,178 kilómetros a caminos rurales, es decir, el 32.5% y 40.5% de la red nacional, respectivamente. La suma de las dos redes, de caminos alimentadores y rurales, representan el 72.7% de la red total nacional (Dirección General de Planeación [DGP], 2022).

La red de caminos rurales y alimentadores en México tienen una gran relevancia para la comunicación no solo entre los centros de población, sino también hacia los polos regionales de desarrollo, incluyendo los centros de consumo y de producción en el medio rural. Además, los caminos rurales y alimentadores permiten el acceso de amplios grupos de población a servicios básicos de salud y educación (Balbuena et al., 2021).

Por lo que, las mejoras y trabajos de adaptación al cambio climático en este tipo de caminos permite que estén disponibles la mayor parte del año, así como reducir los costos de transporte y el tiempo de desplazamiento de los usuarios, además que dichos caminos podrían ser importantes para prestar ayuda humanitaria y formar parte de algunas

rutas redundantes en caso de algún bloqueo importante en la red federal de carreteras (Pérez, 2020).

Por su parte, la adaptación de las carreteras a la variabilidad y cambios climáticos tiene como objetivo 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 maximizar la rentabilidad de las inversiones (CAF, 2018). Por lo que, uno de los grandes retos consiste en incluir criterios de adaptación al cambio climático en la conservación, mantenimiento, mejoramiento o reconstrucción de caminos rurales y alimentadores ya existentes, así como en el diseño de nuevos caminos, de tal manera que se logre aumentar su resiliencia al clima.

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 proyectos encaminados al proceso de adaptación de la infraestructura carretera en México (Mendoza et al., 2017 y 2019; Gradilla et al., 2018). Continuando con la línea de trabajo sobre adaptación al cambio climático, se realizó esta investigación para sugerir algunas pautas técnicas y socio-organizativas para la adaptación al cambio climático de los caminos rurales y alimentadores en México.

Por lo que, el proyecto se enmarca en las líneas de investigación “mitigación y adaptación al cambio climático”, así como “ transporte rural y desarrollo comunitario” 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 “Disminuir la vulnerabilidad al cambio climático de la población, los ecosistemas y su biodiversidad, así como de los sistemas productivos y de la infraestructura estratégica mediante el impulso y fortalecimiento de los procesos de adaptación y el aumento de la resiliencia”, del Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024.

1. Los caminos rurales y alimentadores ante el cambio climático

La exposición de los caminos rurales y alimentadores a riesgos relacionados con el clima, sumada a sus muy diversas condiciones de vulnerabilidad, han generado y seguirán generando grandes pérdidas económicas en México. Algunos países centroamericanos como Guatemala¹, El Salvador² y Nicaragua³ han empezado a preocuparse por incluir criterios de adaptación tanto para la construcción como para el mantenimiento, mejoramiento y rehabilitación no solo de sus carreteras principales sino también de sus caminos rurales o vecinales, redes secundarias y terciarias.

1.1 Los caminos rurales y alimentadores en México

Nuestro país contaba hasta el año de 2021 con una red nacional de carretas de 401,366 kilómetros, de los cuales 130,494 kilómetros correspondían a caminos alimentadores y 161,178 kilómetros a caminos rurales, es decir, el 72.7% del total de la red nacional (DGP, 2022). Para identificar claramente un camino alimentador de un camino rural, se considerarán las definiciones y características que se resumen en la Figura 1.1 y que se comentan a continuación.

El camino alimentador se caracteriza por ser generalmente de dos carriles, en su gran mayoría pavimentados (93.3% en el 2021), pero también se contó en el 2021 con 6.2% de caminos revestidos y un 0.5% de terracería

¹ Manual para la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de caminos rurales con enfoque de gestión y adaptación a la variabilidad y al cambio climático. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. Universidad Rafael Landívar. Junio 2013, Guatemala.

² Proyectos de la Dirección de Adaptación al Cambio Climático y Gestión Estratégica del Riesgo (DACGER) del Ministerio de Obras Públicas y de Transporte del Gobierno de El Salvador.

³ Guía metodológica y diseños típicos de obras para caminos vecinales como medidas de reducción del riesgo a desastre y adaptación al cambio climático.

(ver Tabla 1.1), para un tránsito promedio diario anual de 100 a 1500 vehículos.

En el año 2021, los caminos alimentadores representaban el 32.5% de la red carretera nacional, siendo Jalisco y Veracruz las entidades federativas con una mayor longitud de caminos alimentadores, 12,372 km y 9,300 km, respectivamente, en el año 2021 (SICT, 2021a).

Camino alimentador			Camino rural	
				
Concepto	Tipo		Concepto	Tipo
	C	D		E
Superficie de rodamiento	Pavimentada	Pavimentada**	Superficie de rodamiento	Revestida*
Aforo diario	500 - 1500 vehículos	100 - 500 vehículos	Aforo diario	Hasta 100 vehículos
Velocidad de proyecto	50 - 90 km/h	40 - 70 km/h	Velocidad de proyecto	30 - 50 km/h
Pendiente máxima	6% - 8%	7% - 9%	Pendiente máxima	8 - 12%
Ancho de corona	10.6 m	9.0 m	Ancho de corona	4.5 m
Ancho de calzada	7.0 m	7.0 m	Número de carriles	Un carril con libraderos

Nota: *En su gran mayoría, algunos pueden estar revestidos e incluso ser de terracería. **En su gran mayoría, algunos pueden estar pavimentados y otros pueden ser de terracería.

Fuente: Basado en documentación de la SICT sobre sus programas de caminos rurales y alimentadores, así como en SCT (2018).

Figura 1.1 Definición de camino alimentador y rural

El camino rural se caracteriza por ser, en lo general, de un carril, en su mayoría son caminos revestidos (76% en el 2021), pero también se contó en el 2021 con 21.8% de terracerías y 2.2% de caminos pavimentados (ver Tabla 1.2). Dichos caminos cuentan con algunas obras de drenaje que permiten transitarlos la mayor parte del año. Estos caminos se encuentran a cargo del gobierno federal, de los gobiernos estatales y de gobiernos municipales.

Los caminos rurales representaban el 40.2% de la red carretera nacional, en el año 2021. Siendo Oaxaca y Chiapas las entidades federativas con una mayor longitud de caminos rurales, 22,164 km y 15,684 km, respectivamente, en el año 2021 (SICT, 2021a).

Tabla 1.1 Longitud de la red alimentadora por entidad federativa según superficie de rodadura, 2021

Entidad Federativa	Total (km)	Pavimentada (km)			Revestida (km)	Terracería (km)
		Subtotal	Cuatro o más carriles	Dos carriles		
Estados Unidos Mexicanos	130494	121725	1736	11989	8067	702
Aguascalientes	1133	1060	44	1016	72	0
Baja California	1108	1108	1	1107	0	0
Baja California Sur	1729	595	0	595	655	479
Campeche	2789	2789	0	2789	0	0
Coahuila	3226	3226	142	3084	0	0
Colima	894	886	32	855	7	0
Chiapas	5200	4961	0	4961	239	0
Chihuahua	6870	6870	11	6858	0	0
Ciudad de México	0	0	0	0	0	0
Durango	3527	2987	20	2967	482	58
Guanajuato	5731	5572	0	5572	159	0
Guerrero	4499	4499	0	4499	0	0
Hidalgo	3935	3928	185	3743	0	7
Jalisco	12372	11828	528	11301	544	0
México	5708	4836	0	4836	872	0
Michoacán	4504	4386	45	4341	117	0
Morelos	1292	1292	64	1228	0	0
Nayarit	2038	1716	26	1690	322	0
Nuevo León	3350	3350	11	3340	0	0
Oaxaca	4987	4915	0	4915	72	0
Puebla	4283	4205	10	4196	78	0
Querétaro	1524	1492	61	1431	31	0
Quintana Roo	2570	2369	92	2278	201	0
San Luis Potosí	6502	6502	7	6495	0	0
Sinaloa	4063	4063	178	3885	0	0
Sonora	5123	5123	70	5053	0	0
Tabasco	7370	5812	58	5754	1558	0
Tamaulipas	4003	3130	44	3086	874	0
Tlaxcala	1121	1110	0	1110	12	0
Veracruz	9300	7370	10	7360	1772	158
Yucatán	4811	4811	68	4742	0	0
Zacatecas	4934	4934	32	4902	0	0

Nota: Incluye en el estado de Chiapas 1,083.79 km. pavimentados a dos carriles correspondientes a la red alimentadora SICT. La suma de los parciales puede o no coincidir con el total, debido al redondeo de las cifras.

Fuente: SICT (2021a).

Tabla 1.2 Longitud de la red rural por entidad federativa según superficie de rodadura, 2021

Entidad Federativa	Total (km)	Pavimentada (km)	Revestida (km)	Terracería (km)
Estados Unidos Mexicanos	161178	3445	122576	35157
Aguascalientes	518	0	518	0
Baja California	4848	0	4134	713
Baja California Sur	1273	0	1000	273
Campeche	892	155	244	493
Coahuila	3745	0	3745	0
Colima	1115	0	1094	21
Chiapas	15684	112	15194	378
Chihuahua	3964	0	202	3762
Ciudad de México	0	0	0	0
Durango	9749	148	7249	2352
Guanajuato	6618	274	6344	0
Guerrero	6220	0	6220	0
Hidalgo	7726	78	6518	1129
Jalisco	6895	187	6708	0
México	7802	921	6881	0
Michoacán	2600	1007	1352	241
Morelos	401	41	360	0
Nayarit	2305	27	1882	396
Nuevo León	2474	0	2462	12
Oaxaca	22164	0	968	21196
Puebla	4367	50	4317	0
Querétaro	1264	443	770	51
Quintana Roo	2415	0	2415	0
San Luis Potosí	6032	0	6027	5
Sinaloa	6047	0	3537	2510
Sonora	4376	0	4376	0
Tabasco	1786	1	1201	583
Tamaulipas	7793	0	7671	123
Tlaxcala	1216	0	1216	0
Veracruz	11921	0	11003	918
Yucatán	2511	0	2511	0
Zacatecas	4456	0	4456	0

Nota: La suma de los parciales puede o no coincidir con el total, debido al redondeo de las cifras.

Fuente: SICT (2021a).

1.2 Escenarios de cambio climático

De acuerdo con el informe del Grupo de Trabajo I del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC ⁴] (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 SSP⁵ x-y, donde “x” se refiere a la trayectoria socioeconómica compartida e “y” al nivel aproximado de forzamiento radiactivo alcanzado en el año 2100.

Es decir, las emisiones varían entre escenarios según los supuestos socioeconómicos, los niveles de mitigación del cambio climático y los controles sobre la contaminación del aire debida a los aerosoles y precursores de ozono distintos del metano. Los resultados del siglo XXI se presentan a corto plazo (2021-2040), a medio plazo (2041-2060) y a largo plazo (2081-2100).

A continuación, se describen los cinco escenarios proyectados:

- **SSP1-1.9:** es el escenario más optimista, describe un mundo en el que las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) se reducen a cero neto alrededor de 2050. Las sociedades cambian a prácticas más sostenibles, pasando del crecimiento económico al bienestar general. Las inversiones en educación y salud aumentan. La desigualdad disminuye. Los fenómenos meteorológicos extremos son más frecuentes, pero el mundo logra esquivar los peores impactos del cambio climático. Este primer escenario es el único que cumple con el objetivo del Acuerdo de París de mantener el calentamiento global en torno a 1.5°C por encima de las temperaturas preindustriales, con un calentamiento que alcanza los 1.5°C, pero que luego desciende y se estabiliza en torno a los 1.4°C a finales de siglo.
- **SSP1-2.6:** es el siguiente mejor escenario, las emisiones globales de CO₂ se reducen drásticamente, pero no tan rápido, alcanzando cero emisiones después de 2050. Se dan los mismos cambios socioeconómicos hacia la sostenibilidad que en el escenario SSP1-1.9, pero las temperaturas se estabilizan en torno a 1.8°C más altas a finales de siglo.

⁴ Por las siglas en inglés de *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

⁵ Por las siglas en inglés de *Shared Socioeconomic Pathways*.

- **SSP2-4.5:** es un escenario “intermedio”. Las emisiones de CO₂ rondan los niveles actuales antes de empezar a descender a mediados de siglo, pero no llegan el cero neto hasta 2100. Los factores socioeconómicos siguen sus tendencias históricas, sin cambios notables. El progreso hacia la sostenibilidad es lento, y el desarrollo y los ingresos crecen de manera desigual. En este escenario, las temperaturas aumentan 2.7°C a finales de siglo.
- **SSP3-7.0:** en este escenario tanto las emisiones como las temperaturas aumentan de forma constante, las emisiones de CO₂ se duplican aproximadamente respecto de los niveles actuales para 2100. Los países se vuelven más competitivos entre sí, orientándose hacia la seguridad nacional y asegurando su propio suministro de alimentos. A finales de siglo, la temperatura media aumentará 3.6°C.
- **SSP5-8.5:** este es un escenario que representa un futuro que debe evitarse a toda costa. Los niveles actuales de emisiones de CO₂ se duplican aproximadamente en 2050. La economía mundial crece rápidamente, pero se alimenta de la explotación de los combustibles fósiles y de estilos de vida que consumen mucha energía. Para el año 2100, la temperatura media mundial ha subido 4.4°C.

En el corto plazo (2021-2040), en el escenario de emisiones de CO₂ muy bajas SSP1-1.9, 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 SSP1-2.6, en el de emisiones medias SSP2-4.5 y en el escenario de emisiones altas SSP3-7.0; y entre 1.3°C y 1.9°C en el escenario de emisiones muy altas SSP5-8.5.

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.

1.3 Información necesaria para definir medidas de adaptación

La primera acción es poder contar con un mejor inventario de la red de caminos alimentadores y rurales, con sus principales características. En

México, la Red Nacional de Caminos⁶ (RNC) permite el acceso a la red georreferenciada de la mayoría de los caminos pero no se tienen identificados con la clasificación: alimentadores y rurales. En el caso de los denominados caminos rurales de la RNC, no se tiene la misma clasificación para los caminos, por lo que la longitud no coincide con las estadísticas de la SICT.

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 Carreteras⁷, 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). Esta herramienta es muy útil para visualizar geoespacialmente los cambios climáticos esperados en ciertas regiones para determinadas carreteras o red de carreteras.

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.

⁶ <http://rnc.imt.mx/>

⁷ SICLiC: <http://siclic.imt.mx/SICLIC/>

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

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

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 un camino, ya que en la actualidad la influencia del cambio climático en las lluvias altera las curvas IDF para alguna zona donde se deseen diseñar obras hidráulicas.

Por otra parte, es necesario estimar las zonas de riesgo o identificar las amenazas principales a las que está expuesta la red de caminos, para ello se deben estudiar y evaluar las características del entorno natural que pueden exacerbar el impacto futuro de las amenazas en los caminos alimentadores y rurales del país (ver capítulo 4 para mayor referencia).

Adicionalmente, es importante obtener datos espaciales de los eventos históricos, por ejemplo, de eventos hidrometeorológicos, así como los daños que sufrieron los caminos bajo dichos eventos, especificando la parte de la infraestructura vial 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 resiliencia en el elemento de la carretera, 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.

1.4 Posibles criterios de priorización

Uno de los grandes desafíos para las organizaciones de carreteras es que no se cuentan con recursos financieros suficientes para mejorar la totalidad de los caminos rurales y alimentadores que conforman las diferentes redes carreteras del país, ni tampoco para adaptarlos al cambio climático, por lo que se recomienda priorizar las zonas de intervención, tratando de estimar las áreas de riesgo presente y futuro. A su vez, dentro de dichas áreas de riesgo, se pueden priorizar los tramos a intervenir a través de un análisis multicriterio, para lo cual se pueden tomar en cuenta criterios sociales y productivos para definir los tramos estratégicos. A

continuación, se mencionan algunos de los criterios que se podrían tomar en cuenta.

1.4.1 Corredores locales de transporte

Una forma de priorizar el mantenimiento y mejoramiento de los caminos rurales o alimentadores, es la identificación de aquellos que son parte de los corredores locales de transporte, entendidos estos como: los ejes principales junto con sus ramales que concentran el movimiento de pasajeros, e incluso mercancías, y que conectan las comunidades rurales con los centros de población de importancia regional, dichos ejes se conforman por las rutas de los servicios de transporte de pasajeros y los caminos rurales y alimentadores (Balbuena et al., 2021).

Utilizando este criterio se podrían seleccionar adecuadamente aquellos tramos de importancia regional que deben ser priorizados, de tal manera que se mantenga el acceso y la movilidad de la población rural, la mayor parte del año, hacia los puntos oferentes de los bienes y servicios básicos que se requieren, entre los que se encuentran los hospitales y las escuelas. Además, bajo este esquema de priorización se puede aprovechar al máximo los recursos disponibles de los programas de conservación y mantenimiento para dicha infraestructura vial rural a nivel federal, estatal y municipal.

1.4.2 Corredores agropecuarios o turísticos

Si se logra adaptar y, por tanto, mejorar la calidad de la infraestructura de los caminos, así como los servicios de transporte de carga y de personas con fines agropecuarios y turísticos, respectivamente, se podría generar una reducción de costos de transporte; permitiendo, por ejemplo, que la producción agrícola o ganadera de las zonas remotas llegue a los mercados a precios más competitivos y propiciando el desarrollo de nuevas actividades, como el turismo, para generar a su vez un desarrollo más sostenible.

Por lo que, si el camino se encuentra conectando regionalmente algunas regiones agropecuarias, o permite la conexión a centros turísticos, puede tener prioridad para que se lleven a cabo mejoras que permitan adaptarlo al cambio climático. Dicho criterio tendría que ver con la relevancia económica del camino y su papel en la región, teniendo mayor peso si no existen rutas alternas.

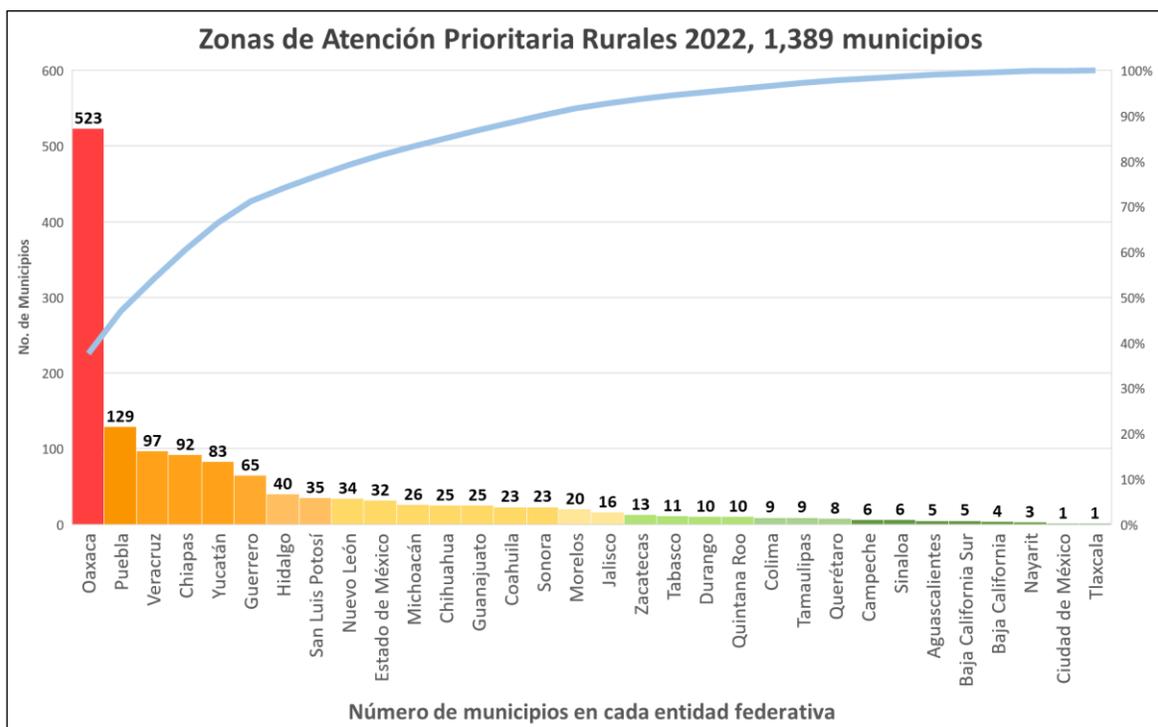
1.4.3 Zonas de atención prioritaria en México

Dentro del Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024 se tiene la acción puntual 1.1.9, a cargo de la Secretaría de Bienestar, que consiste en

apoyar la reducción de vulnerabilidad social relacionada con el cambio climático en comunidades marginadas.

Bajo este argumento, se buscaría incorporar un criterio enfocado al desarrollo social, para reducir la marginación o rezago social de las poblaciones rurales, así como su vulnerabilidad. Esto permitiría dar prioridad a los caminos rurales o alimentadores que se encuentran en algunas de las Zonas de Atención Prioritaria Rurales, es decir, sería una variable con un peso considerable para priorizar dichos caminos.

En el año 2022, dichas zonas estuvieron conformadas por los 1,389 municipios que se encuentran en las 32 entidades federativas (ver Figura 1.2) y que cumplen con alguna de las siguientes condiciones: son de muy alta o alta marginación (de acuerdo al índice de marginación establecido por el Consejo Nacional de Población) o tienen muy alto o alto grado de rezago social o el porcentaje de personas en pobreza extrema es mayor o igual al 50%, o son municipios indígenas, o afromexicanos, o de alto nivel delictivo y son municipios rurales (con una densidad media urbana menor a 70 habitantes por hectárea, una población urbana menor al 90% y que no correspondan a zonas metropolitanas).



Fuente: Elaboración propia con información de la Secretaría de Bienestar.

Figura 1.2 Zonas de atención prioritaria rurales del año 2022

Si analizamos únicamente los municipios con muy alto grado de marginación, de acuerdo a los datos del año 2020, y con alto grado de rezago social para el mismo año, nos encontramos con 136 municipios distribuidos en once entidades federativas, siendo Oaxaca y Guerrero las dos entidades con el mayor número de municipios, 65 y 21 respectivamente (ver Tabla 1.3). De los 136 municipios, 135 de estos son indígenas o tienen alta presencia indígena (ver Tabla 1.4).

Tabla 1.3 Municipios con mayor grado de marginación y alto grado de rezago social, 2020

Resumen por estado [mayor a menor]		
Estado	Municipios vulnerables	% Relativo (top 136)
Oaxaca	65	47.79%
Guerrero	21	15.44%
Chiapas	14	10.29%
Chihuahua	11	8.09%
Veracruz	11	8.09%
Puebla	7	5.15%
Jalisco	2	1.47%
Nayarit	2	1.47%
Durango	1	0.74%
San Luis Potosí	1	0.74%
Tamaulipas	1	0.74%

Fuente: Elaboración propia con información de la Secretaría de Bienestar.

Tabla 1.4 Presencia indígena en los municipios con mayor grado de marginación y alto grado de rezago social, 2020

Resumen por tipo de población		
Tipo de Población	Municipios	% Relativo (top 136)
Municipios indígenas	126	92.65%
Presencia indígena dispersa	6	4.41%
Presencia indígena	2	1.47%
Municipios indígenas por leyes, decretos o sentencias	1	0.74%
Sin población indígena	1	0.74%

Fuente: Elaboración propia con información de la Secretaría de Bienestar.

1.4.4 Redundancia para atención de emergencias

Los caminos que son parte de alguna ruta alterna, en caso un cierre total de las principales carreteras pavimentadas, por ejemplo, provocado por alguna inundación, podrían ser candidatos a que se les implementen acciones de adaptación al cambio climático, de tal manera que provean de redundancia a la red principal de carreteras, así como ser mejorados en su diseño geométrico. Por lo que dicho criterio se podría incluir en el análisis para la priorización de los caminos a mejorar y adaptar.

2. Consideraciones técnicas

La presente sección tiene como finalidad plantear una guía metodológica agrupada por secciones de infraestructura vial en caminos rurales y alimentadores, con base en el informe final “Preservar las obras de tierra y los caminos rurales de los impactos del cambio climático” (PIARC, 2020), del Comité Técnico D.4 de Obras de Tierra y Caminos No Pavimentados de la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC), además de adaptaciones del Manual de Bitumen de SHELL (Hunter et al., 2015), el Marco Metodológico para la Adaptación de la Infraestructura Carretera al Cambio Climático en México del Instituto Mexicano del Transporte (Mendoza et al., 2019) y la Guía de Buenas Prácticas para la Adaptación de las Carreteras al Clima del Banco de Desarrollo de América Latina (CAF, 2018), entre otros.

Dentro de las agrupaciones en las que se presentará la información, se incluyen consideraciones en materia de funcionalidad técnica para trabajos de adaptación al cambio climático, conforme a factores clave en materia técnica, en donde se abordarán recomendaciones inherentes a obras nuevas de acuerdo al diseño geométrico de una sección transversal del camino y a la relevancia de ciertos elementos predispuestos en los mismos, para su segregación en zonas de trabajo y mantenimiento, incluyendo impactos, riesgos y posibles soluciones. Las recomendaciones abarcan principalmente las características de los caminos alimentadores pavimentados, pero también pueden tomarse de referencia para el mejoramiento de los caminos rurales.

2.1 Condición de los caminos rurales y alimentadores en México

La condición estandarizada de los caminos rurales y alimentadores en México, descrita de manera general en la sección 1.1 de esta publicación, contempla una simplificación de elementos técnicos ante lo establecido por organizaciones tales como el Banco Mundial o la Asociación Mundial de la Carretera. Por su parte, el Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA), resalta que los caminos rurales en general son “caminos poco accesibles, no pavimentados, o tienen una capa delgada de asfalto; son más angostos y alejados de las carreteras y cruzan las regiones rurales” (CEDRSSA, 2019); por lo que, si bien se plantearán las especificaciones recomendadas, a partir de estándares

mundiales, para lo que se deba aspirar en un camino propiamente sostenible en los ámbitos ambientales e ingenieriles, tanto para su geometría y elementos que lo integran, como para su estructuración vertical, también se hará uso de la relevancia de cada sección y su aplicación para la adaptación desde un punto de vista realista, inherente a las condiciones actuales de México.

2.2 Elementos de la infraestructura

En primera instancia, y antes de considerar los métodos de adaptación que pudieran aplicarse en la infraestructura carretera vulnerable, es necesario hacer una recapitulación de acuerdo a lo descrito por la PIARC acerca de los elementos que se contemplan en la geometría para las secciones transversales de un camino rural, teniendo como base el reconocimiento de dicha asociación ante el hecho de que “Los estados miembros de la PIARC, o la PIARC misma, no tienen una definición estandarizada de la sección transversal de caminos rurales, ya que existen una variedad de técnicas diversas para la construcción de los mismos en distintas partes y zonas climáticas del mundo” (PIARC, 2020); sin embargo, para fines de estandarización se establecieron los siguientes criterios geométricos:

- Dos carriles
 - Las dimensiones pueden variar entre 2.75m y 3.5m por carril.
- Acotamientos
 - Ayudan a transmitir el agua de lluvia al sistema de drenajes, además de estabilizar el camino en ambos lados del mismo.
- Sistemas de drenaje
 - Dependiendo de la pendiente, puede contener uno o dos drenajes laterales, y las dimensiones pueden variar entre 1m y 2.5m de acotamiento.

En México, de acuerdo al Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras (SCT, 2018), el camino rural, de acuerdo a su denominación geométrica, se clasifica como tipo “E”, el cual tiene un ancho de calzada de 4.5 metros (un carril para ambos sentidos). Las velocidades de operación se encuentran en el rango de 30-50 Km/h y el vehículo de proyecto es el C2, es decir un camión unitario de 2 ejes.

A continuación, se definen algunos de los elementos de la infraestructura (ver Figura 2.1) y, en las secciones posteriores, se hará énfasis en el impacto que pudieran sufrir los distintos elementos ante los efectos del clima.



*AASHTO por las siglas en inglés de *American Association of State Highway and Transportation Officials*.

Fuente: Adaptada de PIARC (2020), Banco Mundial (2019) y CAF (2018).

Figura 2.1 Descripción de elementos de infraestructura carretera

Cabe mencionar que las estructuras hidráulicas no serán directamente abordadas, y se consideran de suma importancia para cada uno de los

elementos nombrados, considerando su aplicación a expertos en hidrología e hidráulica, los cuales complementarían con su análisis, revisión y colocación, en cada uno de los puntos, las necesidades de obras hidráulicas.

2.3 Agrupación de los elementos de la infraestructura carretera

A continuación se describe la agrupación realizada de los diferentes elementos que integran la infraestructura carretera; misma que se realizó siguiendo los ejemplos de agrupación propuestos en el informe final “Preservar las obras de tierra y los caminos rurales de los impactos del cambio climático” (PIARC, 2020) de la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC), así como por el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF) en su “Guía de Buenas Prácticas para la Adaptación de las Carreteras al Clima” (CAF, 2018), en los cuales se presentan agrupaciones para la disposición de segmentos de tratamiento de un camino, optimizando los recursos dispuestos para aproximar las condiciones de la obra a niveles aceptables de resiliencia al clima y, con ello, proveer de accesibilidad a las comunidades que conectan, la mayor parte del año.

Ahora bien, para comprender las agrupaciones con las cuales se realizará el análisis y, tomando en cuenta lo previamente planteado de la conformación de caminos para México, en conjunto con las recomendaciones del CAF, las áreas principales de abordaje deberán ser, geotecnia y taludes, hidrología y drenaje, estructuras, y pavimentos; estando estos últimos más relacionados de manera significativa con los caminos alimentadores del país.

La agrupación se realizará a través de los siguientes “elementos” (véase Tabla 2.1), los cuales servirán como base para las consideraciones técnicas que se recomendarán tener en cuenta.

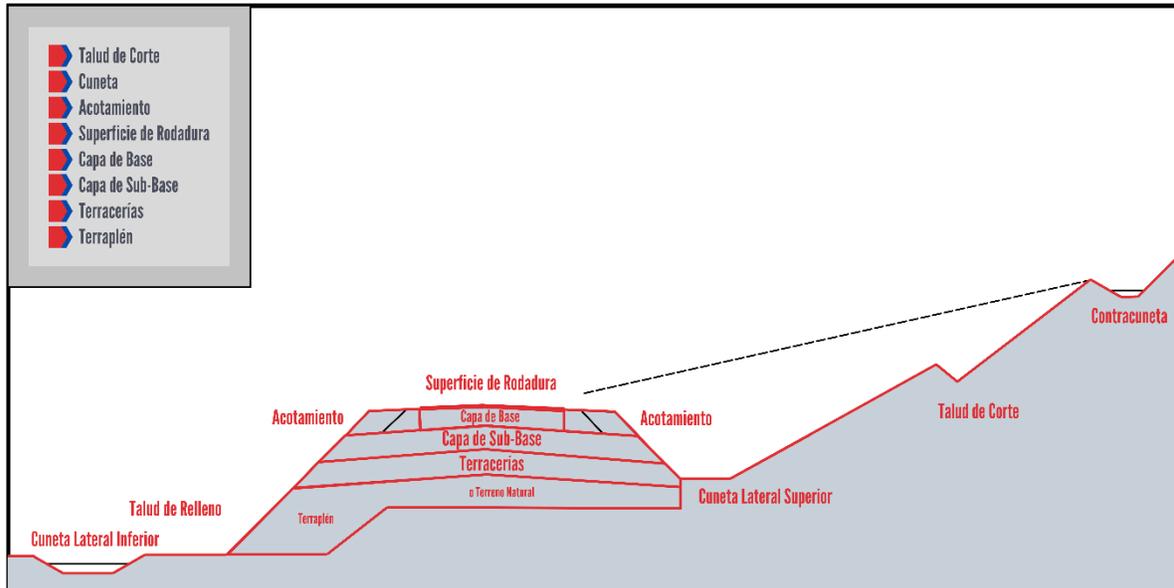
Tabla 2.1 Elementos de la sección transversal del camino

Elementos de la sección transversal del camino							
1	2	3	4	5	6	7	8
Talud de corte	Cuneta	Acotamiento	Superficie de rodadura	Capa de base	Capa de sub-base	Terracerías	Terraplén

Fuente: Adaptada de PIARC (2020).

Los elementos que se presentan en la Figura 2.2 deberán tener de manera adicional un análisis de ingeniería para su correcto diseño; sin embargo, la misma organización que las define, propone una tabla de eficiencia

conforme a cada elemento y su relación con los fenómenos climáticos que más los afectan (ver Tabla 2.2), para así proporcionar a los ingenieros de campo y centros de trabajo una visión más plausible de los elementos de infraestructura a los cuales se les debiesen atribuir recursos para llegar al objetivo de generar caminos rurales y alimentadores resilientes al clima.



Fuente: Adaptada de PIARC (2020).

Figura 2.2 Sección transversal y agrupación de elementos de infraestructura carretera

En las secciones siguientes se presenta un diagrama para cada uno de los elementos de la sección transversal mostrados en la Figura 2.2, los impactos climáticos referidos conforme a la Tabla 2.2, así como los riesgos consecuentes a los impactos y, finalmente, las posibles soluciones.

Tabla 2.2 Resumen de variables que pueden tener una gran variación por el cambio climático y afectar los elementos de la sección transversal del camino

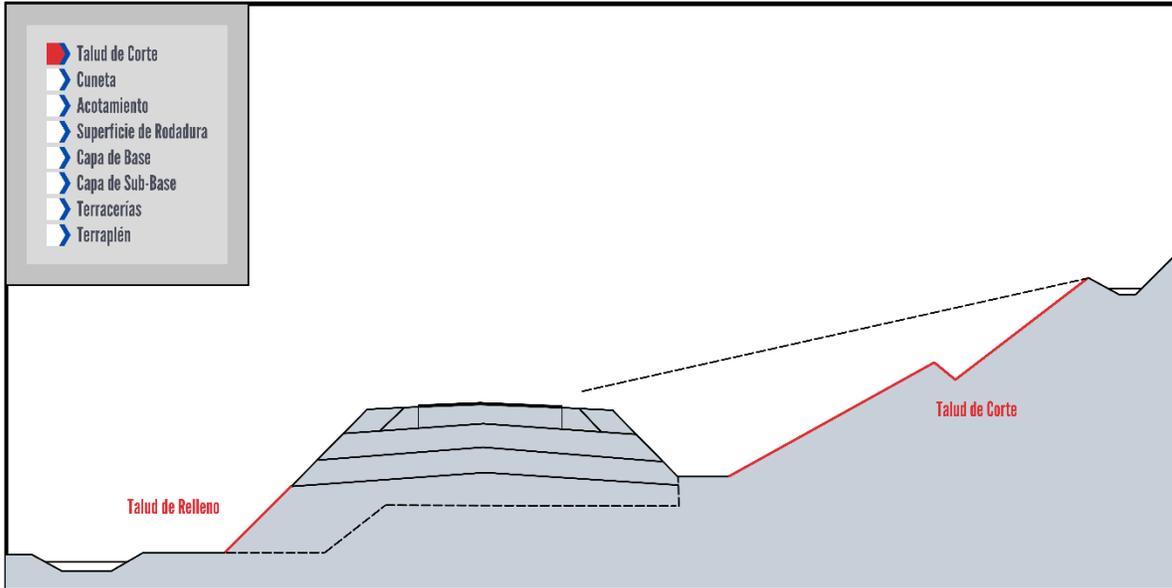
			Elementos de la sección transversal del camino								
			1	2	3	4	5	6	7	8	
			Talud de corte	Cuneta	Acotamiento	Superficie de rodamiento	Capa de base	Capa de sub-base	Terracerías	Terraplén	
Precipitación	Intensidad [mm/h]	Proporción de ocurrencia de precipitación, expresada en volumen por unidad de tiempo. Es la relación entre la cantidad total de lluvia y el periodo en el que se presenta.	X		X			X		X***	X***
	Duración [minutos u horas]	Duración de la lluvia.	X		X					X***	X***
	Máximo [mm/h]	La lluvia correspondiente a una cierta cantidad y duración que puede esperarse con un periodo de retorno conocido.		X							
Temperatura	Impacto de temperatura [°Cd]	La energía térmica transferida a la estructura del camino durante un periodo ininterrumpido de días fríos o calientes.	X		X	X	X	X**	X***	X***	X***
	Temperatura del aire [°C]	La temperatura máxima medida a 1 metro por encima de la superficie.									
Viento	Velocidad [m/s]	Velocidad del viento, tormentas de arena y tolvánicas.	X*					X*			X
Escorrentía	Cantidad máxima [m³/s]	Porción de la precipitación máxima que se presenta en las cunetas o alcantarillas.		X						X***	X***
	Volumen máximo [m³]	Volumen máximo de agua que tiene que ser almacenada temporalmente durante un periodo de lluvia.								X***	X***

Nota: *Considerado en combinación con impacto de temperatura. **Sólo en áreas con permafrost. ***Hace referencia a las terracerías y terraplén, son afectados por el cambio climático. Pero no es sencillo separar los impactos en pendientes y estructuras hidráulicas (cunetas y alcantarillas) de las causadas en terraplenes y terracerías.

Fuente: Adaptada de PIARC (2020).

2.3.1 Talud de corte

Se considerarán las pendientes intrínsecas en los taludes de corte y de terraplén del terreno natural para la conformación de la sección transversal del camino.



Fuente: Adaptada de PIARC (2020).

Figura 2.3 Ubicación del talud del corte y del talud de relleno en la sección transversal

2.3.1.1 Precipitación y cuerpos de agua

Impactos climáticos

- Intensidad de lluvia.
- Duración de la precipitación.

Riesgos

La presencia de lluvias o corrientes de agua sobre las pendientes de los taludes y cortes conlleva a una erosión intrínseca al fenómeno y, a su vez, puede causar deslaves de material y deslizamientos.

Posibles soluciones

Dentro del abanico de opciones dispuestas para este elemento del camino, tanto en sus etapas de prevención, como de mantenimiento, la PIARC (2020) sugiere que se pueden utilizar **(1) suelos finos cohesivos**, creando una superficie densa que, al combinarse con **(2) pendientes someras**, propiciará la circulación del agua sin desgaste del material base;

especificando que, dependiendo de la duración e intensidad de la precipitación, el exceso de flujo podría llegar a dañar la superficie misma provocando surcos, etc.

De igual manera, para contrarrestar ese efecto, que es relativamente común en los caminos de México, se recomienda la construcción de **(2) pendientes** menos agresivas combinadas con el uso de **(3) vegetación** para la estabilización de las mismas (SICT, 2021b), como el vetiver u otras especies, las cuales evitarán los efectos generales abrasivos de la corriente de agua, reteniendo y reduciendo la velocidad del flujo. Las especificaciones de esta vegetación serán variadas y deberá de tratar de adaptarse al entorno para su elección, considerando la resistencia al aire contaminante por la cercanía a la carretera y que posean una red de raíces densa. Se recomienda además hacer uso de vegetación local que permita una mayor sobrevivencia.



Fuente: Fotografía de autoría propia.

Figura 2.4 Ejemplo de estabilización de un talud de corte a través de la revegetación

En contraparte, si la región no permite la adecuación de plantas, en entornos desérticos y semidesérticos, como lo sería la parte norte y noroeste del país, se recomienda el uso de **(4) geotextiles** diseñados para trabajar en conjunto con el terreno y prever condiciones de sequía, así

como picos de precipitación concentrada, con una referencia útil en la sección de la Normativa para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (NIT-SICT) en su apartado de “Características de los Materiales”, directamente en la sección de “Materiales Diversos”, y siendo específicos en la normativa para Geosintéticos (N-CMT-6-01-001/13).



Fuente: Fotografía de autoría propia.

Figura 2.5 Ejemplo de geotextil instalado para evitar erosión

De igual forma, para caminos circundantes a cuerpos de agua, en el que las pendientes tengan interacción con los mismos, se suele utilizar la protección de rocas de gran tamaño que servirán como **(5) diques de absorción ante energía de oleaje y de protección contra inundaciones**. Esta solución puede complementarse con **(4) geotextiles** que reduzcan la pérdida de materiales finos que erosionan el cuerpo del terraplén y que pueden contaminar el cuerpo de agua. La estrategia más extrema que recomienda la CAF (2018) consiste en **(6) elevar la cota de la subrasante del camino** para que, en caso de crecientes del nivel de aguas máximas, la superficie de rodadura del camino no se inunde.

Ahora bien, continuando con las soluciones morfológicas al problema, de acuerdo con el marco del reporte de la PIARC (2020), se debe considerar la causa subyacente del mismo, es decir los escurrimientos naturales de agua, por lo que resulta necesario la **(7) aplicación de estructuras hidráulicas** paralelas al camino; lo cual reducirá la erosión de la estructura del camino, coadyuvadas por tareas de mantenimiento para procurar que el material mismo de la cuneta, en obras de tierra que se tienen en zonas rurales de México, no bloquee el funcionamiento de la misma.

2.3.1.2 Temperatura y viento

Impactos climáticos

- Impacto de la temperatura en los materiales del terraplén.

Riesgos

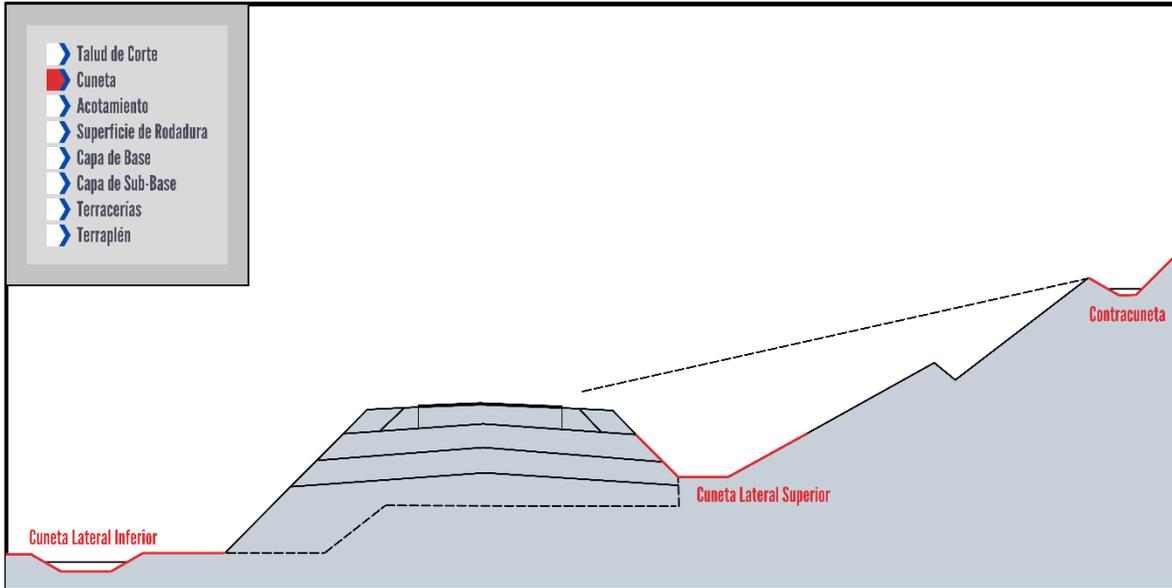
Las sequías prolongadas causan, valga la redundancia, un secado de la superficie de los taludes, lo que a su vez se ve reflejado en la falta de cohesión de partículas finas, que terminan siendo susceptibles a la erosión o desprendimientos por efecto del agua o del viento.

Posibles soluciones

Debido a que, como bien se menciona, la degradación superficial es el factor dañino en condiciones de viento, se recomienda, en primera instancia, y apoyado de estudios técnicos de ingeniería y factibilidades, la aplicación de **(1) pendientes menos agresivas**, combinadas con soluciones de **(2) vegetación** de características densas como recubrimiento de la misma (SICT, 2021b), incluso la aplicación de **(3) geotextiles orgánicos**, lo que de igual forma previene deslaves de material a la superficie de rodadura (Banco Mundial, 2019).

2.3.2 Cunetas

La presente sección presentará la relevancia de las cunetas y contracunetas como zanjas laterales paralelas al camino, las cuales tienen un impacto directo en el comportamiento estructural de las capas de pavimento o en el talud de terraplén del camino, e incluso en la superficie de rodadura de la calzada.



Fuente: Adaptada de PIARC (2020).

Figura 2.6 Ubicación de las cunetas en la sección transversal

2.3.2.1 Precipitación y escorrentía

Impactos climáticos

- Precipitación máxima.
- Caudal máximo de escorrentía.

Riesgos

Considerando un incremento en el periodo de retorno, la cuneta deberá ser capaz de manejar flujos altos que, a su vez, puedan ocasionar erosión.

Si la escorrentía incrementa de igual manera, se deberá considerar si la sección logra manejar el caudal o si su área hidráulica deberá ser ampliada, o considerar redundancia del sistema en estructuras hidráulicas (alcantarillas, pasos de agua, puentes pequeños, etc.) (Banco Mundial, 2019).

Posibles soluciones

Para las posibles soluciones referentes a la interrelación impacto-estructura, vale la pena profundizar acerca de los **(1) métodos de medición** para el dimensionamiento de las cunetas, ya que se deberían de utilizar modelos numéricos predictivos para la determinación del nivel de escorrentía y la precipitación esperada, con datos que bien podrán ir ligados a herramientas como las ya mencionadas en la sección 1.3 de esta

publicación, el Sistema de Información Climática para el Diseño de Infraestructura Carretera (Mendoza et al., 2021) o el portal de conocimientos sobre cambio climático del Banco Mundial, en el apartado de los datos disponibles para México¹⁰.

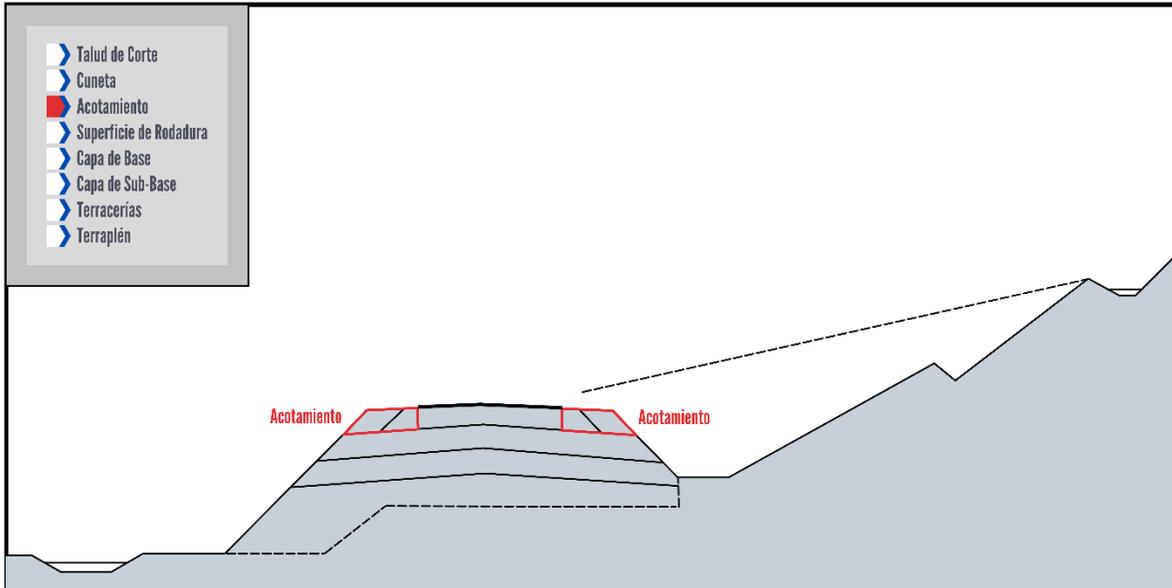
En cuanto a la estructura directa, el Departamento de Transporte de Washington, EE. UU., en su curso de estándares de ingeniería, de “*Entrenamiento en Hidráulica e hidrología*” (WSDOT, 2019), se plantea, con una disposición previa del cálculo hidráulico, que se tenga al menos una **(2) profundidad en la zanja** de 15 cm entre la base y la superficie de elevación con periodos de retorno a 10 años. Este periodo de retorno debe considerar los escenarios del cambio climático.

La PIARC (2020) recomienda, en términos de su **(3) geometría**, el uso de secciones trapezoidales, sin embargo, las cunetas dispuestas como un canal triangular también son aceptadas; respetando en conjunto con las medidas pasadas una pendiente máxima lateral de 2:1.

Finalmente, se recomienda el análisis de la zona en donde se localiza el camino, especialmente en los terrenos aledaños, cuya topografía está compuesta de terrenos elevados, donde se debe considerar la implementación de **(4) contracunetas**, las cuales evitarán el paso del agua a los taludes de corte o de los terraplenes circundantes, adicionando **(5) suelos impermeables** como base del terraplén, y **(6) vegetación**, procurando aprovechar las características de especies monocotiledóneas, como los juncos, para la redirección del agua (AACRuS, 2022), o la combinación de materiales permeables en el drenaje subterráneo tales como las zanjas paralelas a la dirección del camino con vegetación de baja altura (SICT, 2021c) y **(7) rellenos** de madera o piedras divisorios a la zanja dentro del proceso constructivo.

¹⁰ <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/mexico>

2.3.3 Acotamientos



Fuente: Adaptada de PIARC (2020).

Figura 2.7 Ubicación del acotamiento en la sección transversal

2.3.3.1 Precipitación

Impactos climáticos

- Intensidad de lluvia.
- Duración de precipitación.

Riesgos

El riesgo principal por los impactos climáticos establecidos es la erosión en la superficie del acotamiento que acelera su deterioro.

Posibles soluciones

Dentro de la adecuación a la lluvia de los acotamientos en los caminos, ya sea con superficies revestidas o no revestidas, se sugiere la aplicación de un **(1) sello** a dicho elemento del camino (PIARC, 2020).

2.3.3.2 Temperatura

Impactos climáticos

- Impacto por temperatura.

Riesgos

Si el periodo de días calurosos ininterrumpido se extiende, la capa inferior del suelo se calienta y los enlaces capilares del subsuelo pueden evaporarse, causando respectivamente grietas en el suelo de cimentación que pueden extenderse al pavimento (PIARC, 2020; Departamento de Caminos y Carreteras de Bangladesh, 2001).

Los pavimentos flexibles son más susceptibles a las deformaciones por las altas temperaturas.

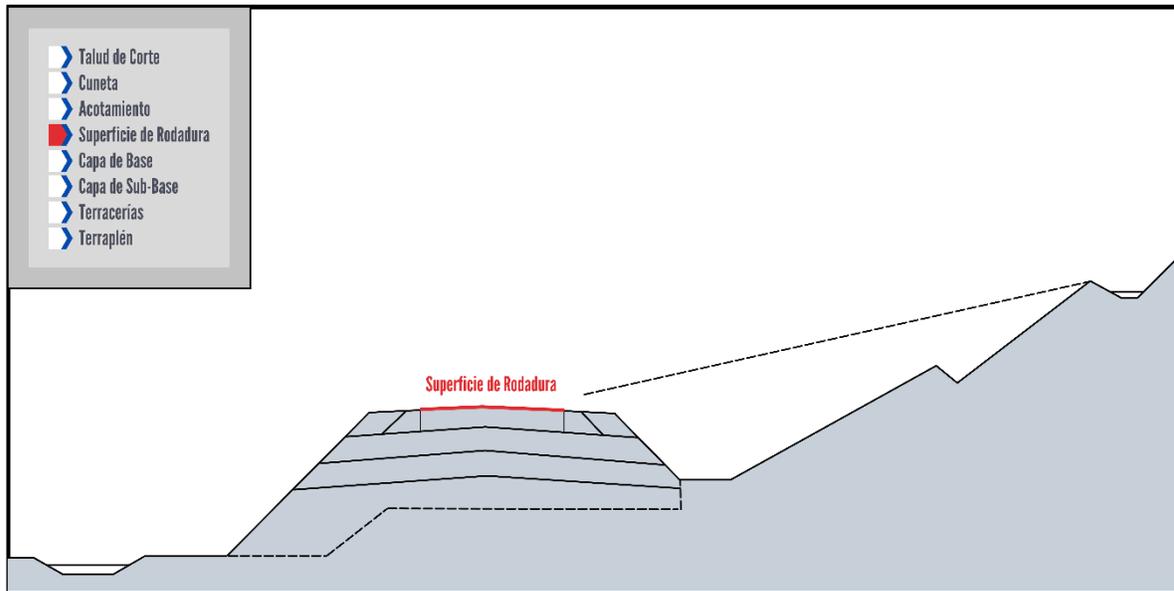
Posibles soluciones

Puesto a que la causa del agrietamiento en los acotamientos de caminos va ligada a expansiones y contracciones de los suelos arcillosos subyacentes, iniciando por las secciones del camino más alejadas del eje central (siendo los acotamientos una de las más relevantes). Una de las soluciones es la aplicación de **(I) pantallas, mallas de sombra o geotextiles** en profundidades inferiores a los 2 metros (Berche, 2016) para evitar la pérdida de humedad del suelo y cambios en el perfil de succión.

Es importante considerar asfaltos adaptados a la temperatura del sitio para obtener un comportamiento adecuado de la mezcla asfáltica con la que se construyen los acotamientos.

2.3.4 Superficie de rodadura

Se consideran una superficie de rodadura las carpetas asfálticas, que son con las que cuentan la mayoría de los caminos alimentadores y algunos pocos de los caminos rurales de México.



Fuente: Adaptada de PIARC (2020).

Figura 2.8 Ubicación de la superficie de rodadura en la sección transversal

2.3.4.1 Precipitación

Impactos climáticos

- Intensidad de lluvia.
- Duración de precipitación.

Riesgos

La precipitación afecta la durabilidad de la superficie de rodadura, por el impacto, por su acumulación y el tiempo de eliminación de la calzada. La precipitación acelera el deterioro de la carpeta asfáltica.

La intensidad de lluvia y la velocidad de escurrimiento de los flujos erosionan la superficie de rodadura.

Posibles soluciones

Considerar sellar adecuadamente la superficie de rodadura y procurar, durante el mantenimiento del camino, que se realicen tratamientos superficiales para proteger la carpeta asfáltica.

2.3.4.2 Temperatura

Impactos climáticos

- Impacto por temperatura.

Riesgos

Si se extienden los periodos de altas temperaturas ininterrumpidas o se alcanzan valores extremos, la totalidad de la capa de asfalto podría perder rigidez y así causar inestabilidad, perdiendo su capacidad de carga.

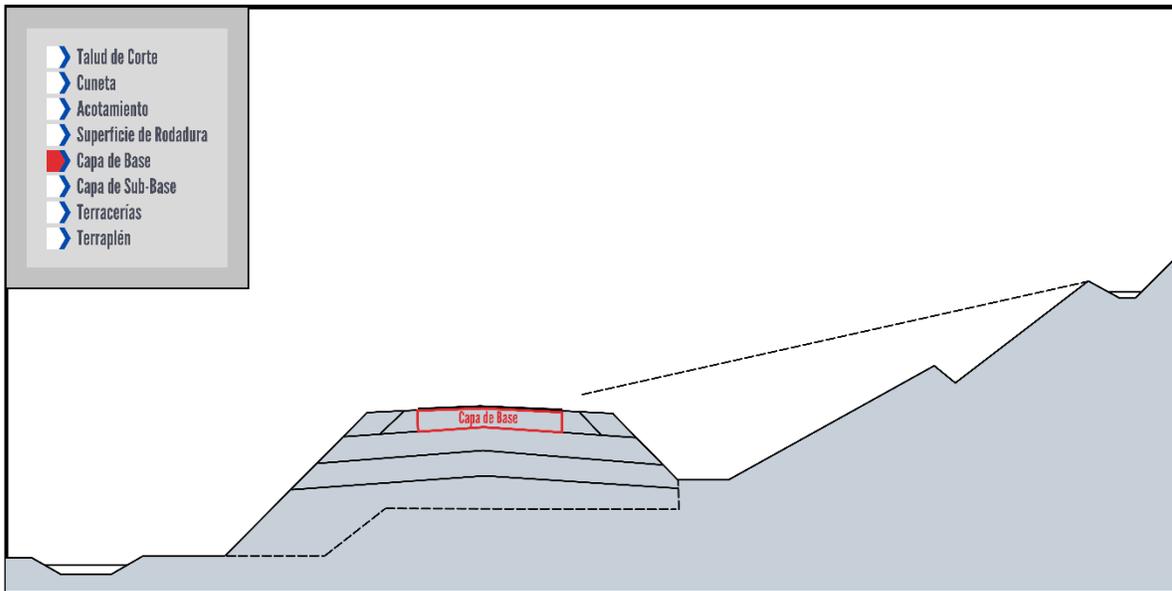
Posibles soluciones

Debido al estrés causado por los efectos de cambios de temperatura abruptos en las mezclas asfálticas y, considerando las condiciones actuales de México en cuanto a los escenarios climáticos, cabe mencionarse el efecto de ablandamiento en la sección superior de la carpeta, por lo que se considera hacer uso de herramientas climáticas, como el SICliC mencionado en la sección 1.3, para crear un **(1) diseño correcto de mezclas** de acuerdo a la región y las temperaturas que ahí se presentan, seleccionando un grado de desempeño del asfalto de acuerdo a los registros de temperatura en el sitio.

De igual forma, vale la pena mencionar la presencia de materiales no deseados en la capa de rodadura, tales como materiales finos y granulares desprendidos y arrastrados por vientos ante sequías prevalentes, por lo cual se recomienda el **(2) mantenimiento correctivo** de dichas zonas y, en casos extremos, la **(3) elevación de la cota** superior del camino en 0.8 metros conforme al terreno natural (PIARC, 2020) o lo que corresponda según las obras de drenaje.

2.3.5 Base

Considerando el desarrollo de caminos de terracerías en el país, la sección de la base en una estructura carretera toma gran importancia, ya que las prácticas comunes y la experiencia en campo apunta a que, en los caminos no revestidos, la base actúa como el contacto directo con los vehículos que transitan por los mismos, es decir, es la superficie de rodadura directa.



Fuente: Adaptada de PIARC (2020).

Figura 2.9 Ubicación de la capa de base en la sección transversal

2.3.5.1 Precipitación

Impactos climáticos

- Intensidad de lluvia.
- Impacto por temperatura.
- Viento (en ausencia de carpeta asfáltica).

Riesgos

Las sequías prolongadas, de acuerdo a la PIARC y al Banco Mundial (2020 y 2019, respectivamente) pueden causar una disgregación entre las partículas finas y la superficie de la base; lo cual, combinado con vientos o lluvia, pueden causar la erosión o el lavado de las mismas, conllevando finalmente a desprendimientos mayores, a la destrucción del elemento y pérdida de la capacidad de carga, así como la generación de daños superficiales como baches y asentamientos.

Posibles soluciones

Si bien una de las soluciones clave en los problemas ligados a la base de un camino es, indudablemente, la aplicación de una **(1) carpeta asfáltica**; considerando las características de los caminos rurales en México, podría no ser posible por los costos que ello implica, por lo que la alternativa más factible sería proporcionar un revestimiento con algún tratamiento superficial.

De acuerdo a los Asociados de Investigación Aplicada Canadiense (ARA¹¹) (MacLeod y Hindinger, 2008), existe una forma de evaluar caminos con superficies selladas y de grava; donde se considera el **(2) Índice de Condición de Gravas** (GCI) con los componentes del *Índice de Condición del Camino* (RCI) y las fórmulas correspondientes para el *Índice de Manifestaciones de Afectaciones en Gravas* (GDMI), con la interrelación de los valores de peso (W), severidad (s) y extensión (e) para evaluar la condición de una camino con una superficie de rodadura con material granular:

$$GDMI = \sum_{i=1}^n W_i(s_i + e_i)$$

Tabla 2.3 Tabla de factores y pesos

Factor	Valor de peso (W _i)
Factores independientes del tiempo de medición	
Cantidad de grava	3
Sección transversal	3
Fallas en el subgrado	3
Asentamientos	3
Drenaje lateral	2
Esfuerzos de mantenimiento	3
Factores dependientes del tiempo de medición	
Agrietamiento	2
Baches	1
Lavado	1
Drenaje superficial	2
Grava suelta	1
Deslizamiento	1
Polvo	1
Parqueo	1

Fuente: Adaptada de MacLeod (2008).

En cuanto a la evaluación de la severidad (s) de las afectaciones, se propone una escala del 1 al 5, siendo 5 el valor más alto. Cabe mencionar que esta es una escala cualitativa y se confía en la opinión experta y experiencia del ingeniero calificador.

Para la evaluación de la extensión (e), se sigue lo establecido por el Banco Mundial (2019), donde se utiliza la misma escala numérica previamente mencionada, pero ésta va ahora relacionada con el porcentaje de superficie afectada (ver Tabla 2.4).

¹¹ Por las siglas en inglés de “Applied Research Associates”.

Tabla 2.4 Ponderación conforme al porcentaje de superficie afectada

% Superficie afectada	Valor
< 10%	1
10 - 20%	2
20 - 40%	3
40 - 80%	4
80 - 100%	5

Fuente: Adaptada de MacLeod (2008).

Una vez calculado el *Índice de Manifestaciones de Afectaciones en Gravas* (GDMI), con los pesos y valores tanto de la severidad (s) como de la extensión (e), se calcula el valor del *Índice de Condición del Camino* (RCI) de manera subjetiva de acuerdo al nivel de confort que se percibe durante el recorrido por el camino (ver Tabla 2.5).

Tabla 2.5 Niveles de confort

Valor	Nivel de confort
10 - 8	Muy buenas condiciones
8 - 6	Buenas condiciones, con algunos asentamientos y desniveles
6 - 4	Cómodo, con asentamientos y desniveles intermitentes
4 - 2	Incómodo, con asentamientos o desniveles frecuentes
2 - 0	Incómodo, con asentamientos y desniveles constantes

Fuente: Adaptada de MacLeod (2008).

Finalmente, se puede obtener el **Índice de Condición de Gravas** (GCI), con los valores del GDMI y el RCI, utilizando la siguiente fórmula:

$$GCI = \left(100 * ((0.1 * RCI) * 0.5) * \left(\frac{192 - GDMI}{192} \right) * 0.924 \right) + 8.856$$

El resultado de la fórmula del **Índice de Condición de Gravas** GCI es un número entre 0 - 100, que refleja el tiempo de mejoramiento y adaptación (ver Tabla 2.6), con respecto a la capa de base del camino.

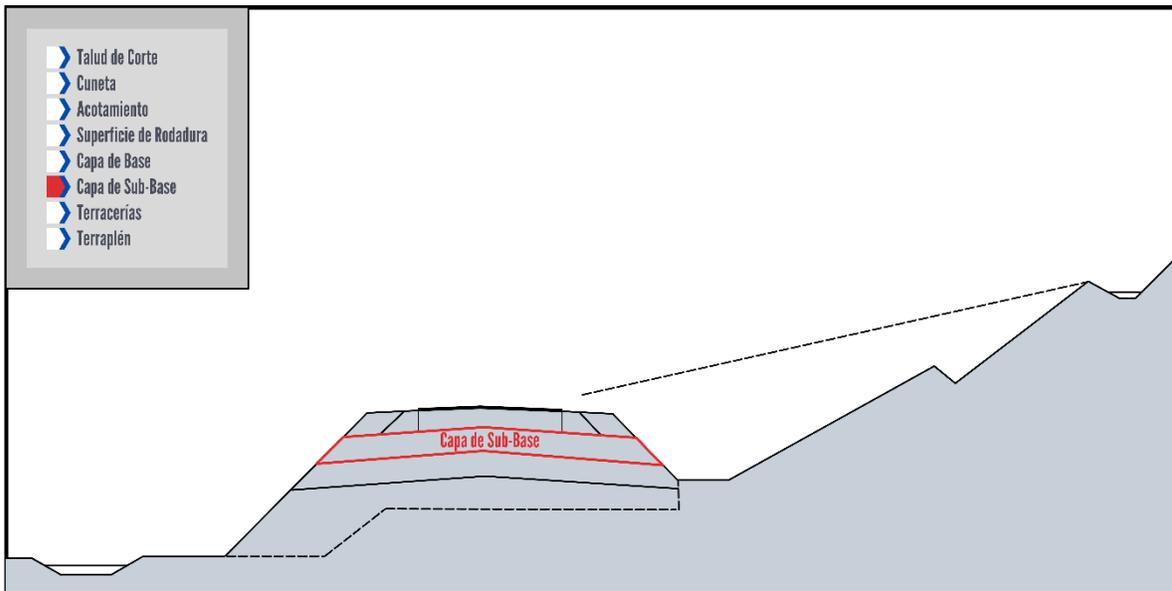
Cabe mencionar que se está tomando en cuenta el procedimiento para caminos en terracerías debido a la situación del 21.8% de los caminos rurales en México, que en el 2021 se registraron como terracerías.

Tabla 2.6 Tabla de puntajes del Índice de Condición de Gravas (GCI)

Tiempo de mejora	GCI - Caminos rurales
	Puntaje
Adecuado	> 80
6 - 10 años	66 - 80
1 - 5 años	46 - 65
Rehabilitar	40 - 45
Reconstruir	< 40

Fuente: Adaptada de MacLeod (2008).

2.3.6 Sub-base



Fuente: Adaptada de PIARC (2020).

Figura 2.10 Ubicación de la capa de sub-base en la sección transversal

2.3.6.1 Precipitación

Impactos climáticos

- Infiltraciones

Riesgos

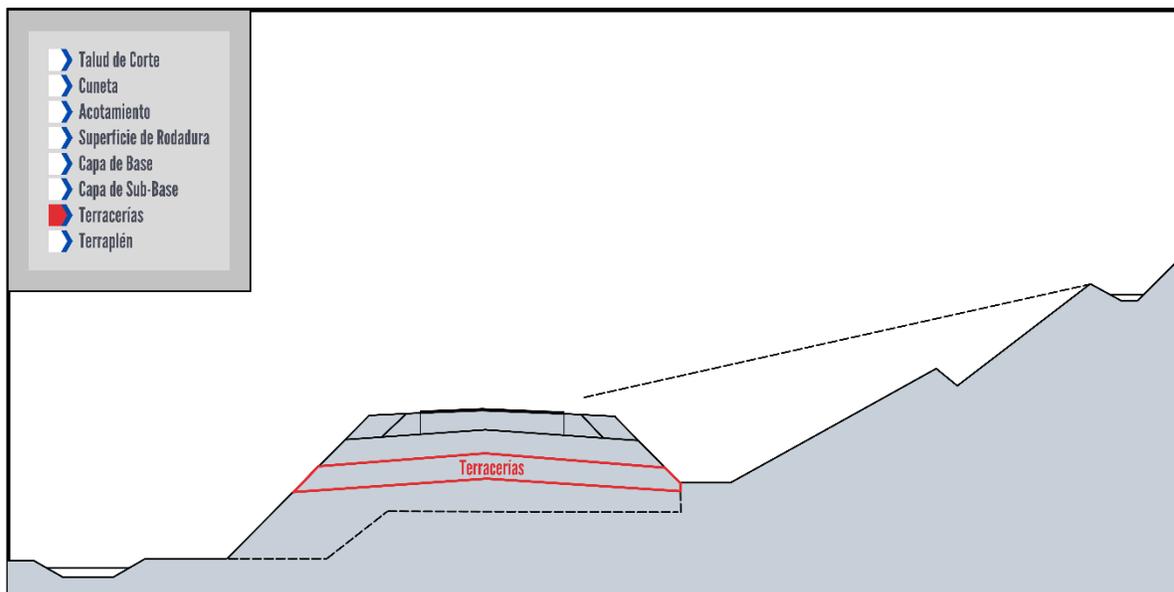
De acuerdo al Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de República Dominicana (MOPC, 2016), además de apoyarse en la sección de Conservación en Trabajos de Reconstrucción de la NIT-SICT, se corren riesgos de cimentación en la capacidad de soporte y deslave de finos, lo que a su vez puede ocasionar desprendimientos.

Posibles soluciones

Dentro de las opciones a considerar, redundan las aplicables para las bases granulares (véase la sección anterior) en sus componentes; sin embargo, de forma concisa, de acuerdo a las NIT-SICT, debe darse lugar a una revisión de **(1) materiales correctos** conforme a lo establecido en la normativa de “Características de los Materiales”, en materiales para pavimentos, específicamente en materiales para sub-bases, en su actualización del 2021 (N-CMT-4-02-001/21), además de hacer **(2) calas** para determinar la compactación, espesor y propiedades de la capa dispuesta; y, finalmente, la correcta **(3) extensión de la capa** de la sub-base en el ancho de la corona.

De igual forma, dentro de las propuestas de solución, debido a las condiciones de los caminos en México y la relevancia de una capa tal como la sub-base en caminos de terracería, y en apego a las NIT-SICT previamente mencionadas, se recomienda el uso de **(4) materiales para estabilización**, como son la cal (N-CMT-03-001/02); así como poder incursionar en otras soluciones o aditivos, como la utilización de multi-enzimas orgánicas no causticas ni corrosivas en la estabilización y densificación de suelos (Cedeño, 2013).

2.3.7 Terracerías



Fuente: Adaptada de PIARC (2020).

Figura 2.11 Ubicación de la terracería en la sección transversal

2.3.7.1 Precipitación y temperatura

Impactos climáticos

- Precipitación y escorrentía

Riesgos

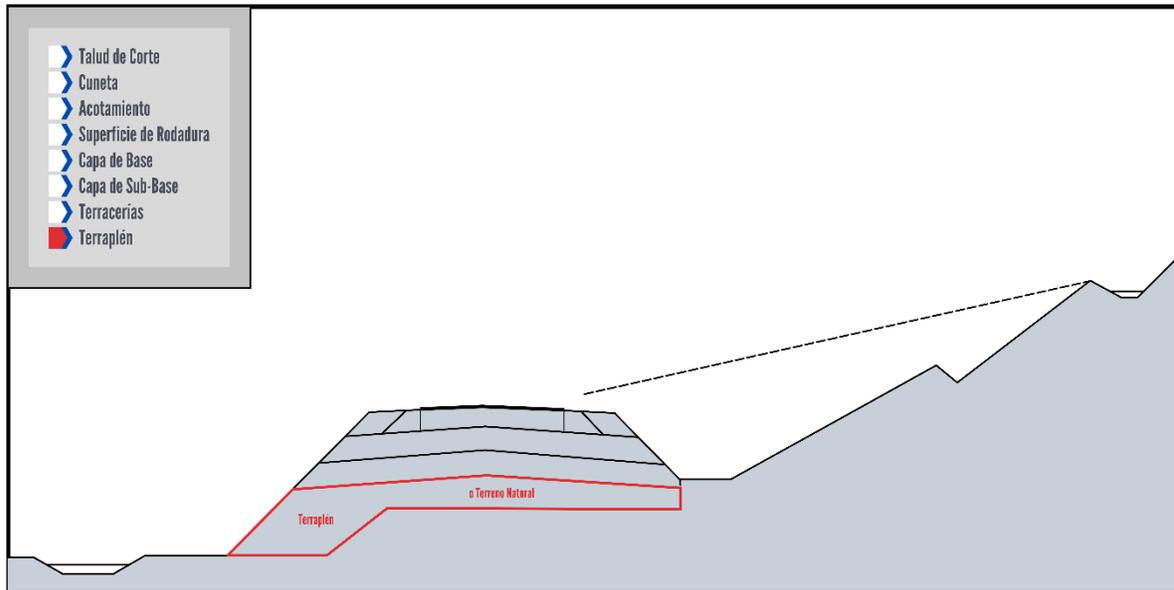
Los riesgos en las terracerías suelen ir directamente ligados a otros elementos de la sección transversal, tales como los acotamientos, los taludes, las cunetas, etc., ya que estos controlan los flujos de agua que son los que eventualmente erosionan las terracerías.

Cuando el nivel freático es muy superficial, se pueden tener problemas de exceso de humedad en la terracería y que, si no se controla, por capilaridad pueden afectar las capas del pavimento.

Posibles soluciones

Puesto a que los problemas circundantes a la terracería, equivalente a la sección de la subyacente para fines constructivos y de análisis en México, conforme a la comparativa con el manual de Bitumen de SHELL (Hunter et al., 2015), que se presentan como un elemento del camino, ubicado bajo la sub-base, y que se construye de manera intermitente en México. Para fines de adaptación, se sugiere la aplicación de **(1) segmentos impermeabilizantes**, y alejarlas de las zonas de paso hidráulico para la prevención de daños superficiales por infiltraciones y alteraciones de suelos y rocas por efecto del agua (CAF, 2018), para ello se pueden construir pedraplenes para alejar el agua del camino o colocar capas impermeables.

2.3.8 Terraplén



Fuente: Adaptada de PIARC (2020).

Figura 2.12 Ubicación del terraplén en la sección transversal

2.3.8.1 Precipitación

Impactos climáticos

- Intensidad de lluvia.
- Impacto por temperatura.

Riesgos

Los terraplenes se presentan como la base de la estructura del pavimento, los riesgos inherentes a la falla de los mismos son graves y, usualmente, se deben al comportamiento de la estructura de la capa granular, ante pérdidas de material por lluvia o altas temperaturas, e incluso teniendo efectos adversos ante situaciones extremas como lo sería el congelamiento, “siendo el agua el que mayores riesgos puede generar” (CAF, 2018).

Posibles soluciones

De acuerdo a la naturaleza de los terraplenes, las soluciones se enfocan en **(1) controlar el agua superficial** e infiltrada a través de estructuras de drenaje de paso, esto de acuerdo a lo analizado en el reporte del “Incremento de la resiliencia de las carreteras del Estado en el Norte de España” (Collazos et al., 2022), en donde se contempla la “gestión del agua

de escorrentía para mejorar la resiliencia de las infraestructuras”, además de plantear métodos de estabilización de taludes de terraplén, tales como lo son la aplicación de **(2) geotextiles para terraplenes**, un mayor detalle se puede encontrar en la NIT-SICT de “Características de los Materiales”, en el apartado de materiales diversos, en donde se encuentra las especificaciones para “Geotextiles para Terracerías”, [N-CMT-6-01-001/13](SCT, 2013); **(3) tratamientos con cal** viva o cal hidratada de acuerdo al apartado de construcción, en carreteras, y terracerías para especificar terraplenes tratados con cal [N-CTR-CAR-1-01-018/21] (SCT, 2021a); y una revisión técnica detallada de todo lo contemplado en los **elementos de la sección transversal 1, 2, 3 y 7**, los que por sus similitudes físico-morfológicas pueden influir en el comportamiento de las terracerías.

3. Consideraciones socio-organizativas para la adaptación

El proceso de adaptación de los caminos rurales y alimentadores en México debe incluir un enfoque integral, en donde se tome en cuenta las vulnerabilidades de las zonas aledañas a los caminos y la posible restauración de los ecosistemas, como la revegetación del terreno circundante al camino, a este respecto la SICT generó recientemente el “Manual de revegetación y reforestación en la infraestructura carretera” (SICT, 2021b), y también el “Manual de planeación, diseño e implementación de infraestructura verde vial” (SICT, 2021c), en donde incluye el papel de la cobertura vegetal en los ecosistemas y en la infraestructura vial. En dichos documentos se hace evidente la necesidad de involucrar a distintos actores de diversos sectores, incluyendo a las comunidades.

El enfoque de las misiones, que se describe a continuación, podría ayudar a organizar los procesos de adaptación, tendiendo siempre presente la participación activa de las comunidades en las distintas fases de los proyectos de caminos rurales y alimentadores, así como de los distintos niveles de gobierno.

3.1 El concepto de las misiones

Basándose en la misión del programa Apolo para ir a la Luna, Mariana Mazzucato (2018) propone retomar dicho enfoque para abordar problemas complejos de la sociedad, como alcanzar los Objetivos para el Desarrollo Sostenible. De esta manera, las denominadas Políticas Orientadas por Misión (POM)¹² permiten anclar un enfoque global a una misión para abordar retos complejos, con la finalidad de abordar las distintas dimensiones del problema y de las posibles soluciones (Dutrénit et al. 2021).

Las misiones tienen objetivos definidos y medibles, en donde se proponen una serie de proyectos que podrían permitir su consecución, por lo que se

¹² Pueden definirse como políticas públicas sistémicas que se basan en conocimientos de avanzada para lograr objetivos específicos (Mazzucato y Penna, 2020).

pueden ver como una manera de orquestar el talento y la experiencia existente de los posibles actores, a nivel nacional, regional y/o local. El enfoque tiene como objetivo crear una cartera de instrumentos para fomentar soluciones desde abajo. En donde el aprendizaje es fundamental, ya que tanto el ensayo y el error como las lecciones aprendidas se convierten en activos fundamentales para retroalimentar y afinar las estrategias, para llegar a alcanzar las misiones (Mazzucato, 2018; Mazzucato y Pena, 2020).

Como ya se mencionó, dentro del Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024 de México, se tiene, entre otros objetivos, el objetivo prioritario 1: Disminuir la vulnerabilidad al cambio climático de la población, los ecosistemas y su biodiversidad, así como de los sistemas productivos y de la infraestructura estratégica mediante el impulso y fortalecimiento de los procesos de adaptación y el aumento de la resiliencia.

Para el fortalecimiento del proceso de adaptación y el aumento de la resiliencia de los caminos rurales y alimentadores en México, que se identifiquen como parte de la infraestructura estratégica del país, se podría adaptar el enfoque de las misiones para desarrollar proyectos e involucrar a distintos sectores como el de transporte, medio ambiente y recursos naturales, desarrollo agrícola, entre otros. Además, sería necesario involucrar a los diferentes actores del sector público tales como: Dirección General de Carreteras (Programa de Caminos Rurales y Alimentadores), Residencias Generales de los Centros SICT¹³, Comisiones Estatales de Caminos/Infraestructura, Gobiernos Municipales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, delegaciones de la Secretaría de Bienestar en los estados, entre otros. También se recomienda incluir distintas asociaciones gremiales como la Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, A.C.; los distintos Colegios de Ingenieros Civiles, así como los líderes comunitarios y otros actores que son clave en los proyectos de adaptación al cambio climático, para aumentar la resiliencia de los caminos, sin perder de vista el equilibrio de los ecosistemas circundantes.

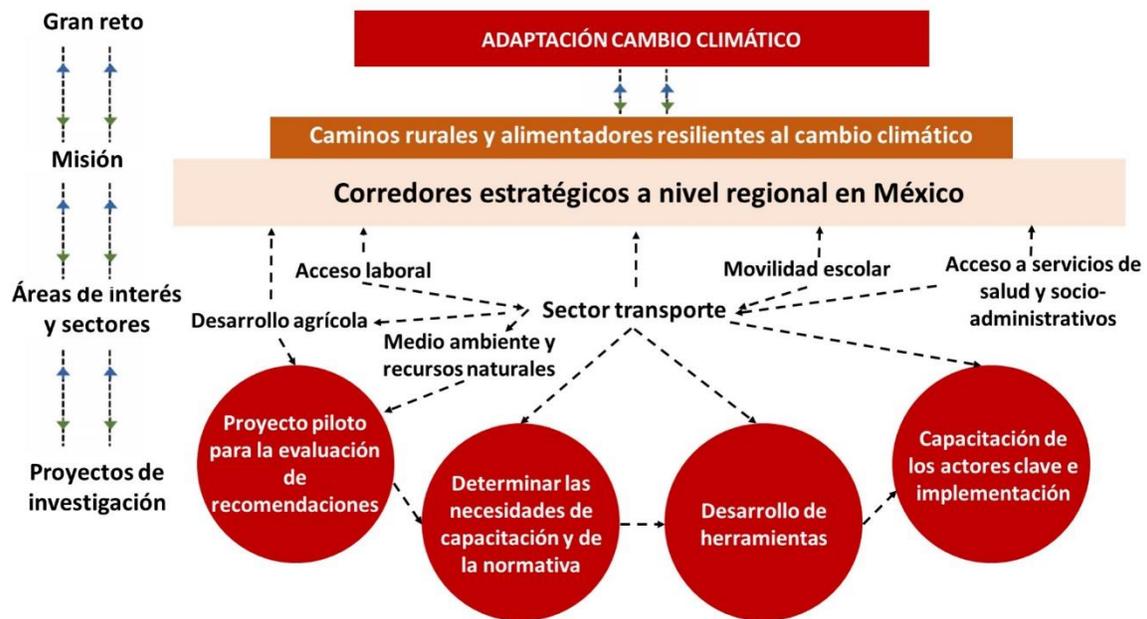
En la Figura 3.1 se muestra un ejemplo de un mapa de misión para adaptar ante el cambio climático los caminos rurales y alimentadores en México. En donde se propone que se lleven a cabo proyectos piloto para evaluar la factibilidad de la implementación de las recomendaciones expuestas en el presente trabajo y en las metodologías que se mencionan, dichos proyectos piloto se llevarían a cabo en algunos de los corredores

¹³ Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes.

estratégicos a nivel regional en México, en distintas zonas geográficas, con diferente tipo de suelo y vegetación, de tal manera que se hagan las adecuaciones necesarias de las recomendaciones.

Posteriormente, se podrían determinar las necesidades específicas de capacitación en los distintos niveles de gobiernos, quienes participan en la construcción, mantenimiento, rehabilitación y mejoramiento de los caminos rurales y alimentadores. Así como establecer los cambios necesarios en la normativa, para que se incluyan los criterios de adaptación al cambio climático en todas las fases de la vida útil de los caminos.

Una vez que se han determinado las necesidades específicas de capacitación, se pueden desarrollar herramientas que ayuden a llevar a cabo dicha capacitación y los trabajos propios del proceso de adaptación. Y finalmente, se deben capacitar a los actores clave e implementar los nuevos procesos de adaptación en las distintas fases de los proyectos de caminos. Esta última etapa abonaría a la acción puntual 1.7.4 “Desarrollar un programa de capacitación para el sector transportes sobre vulnerabilidad y adaptación al cambio climático e implementarlo mediante cursos/talleres regionales en los Centros SICT”, del Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024, así como a las metas de capacitación del propio Instituto Mexicano del Transporte.



Fuente: Adaptada de Mazzucato (2018).

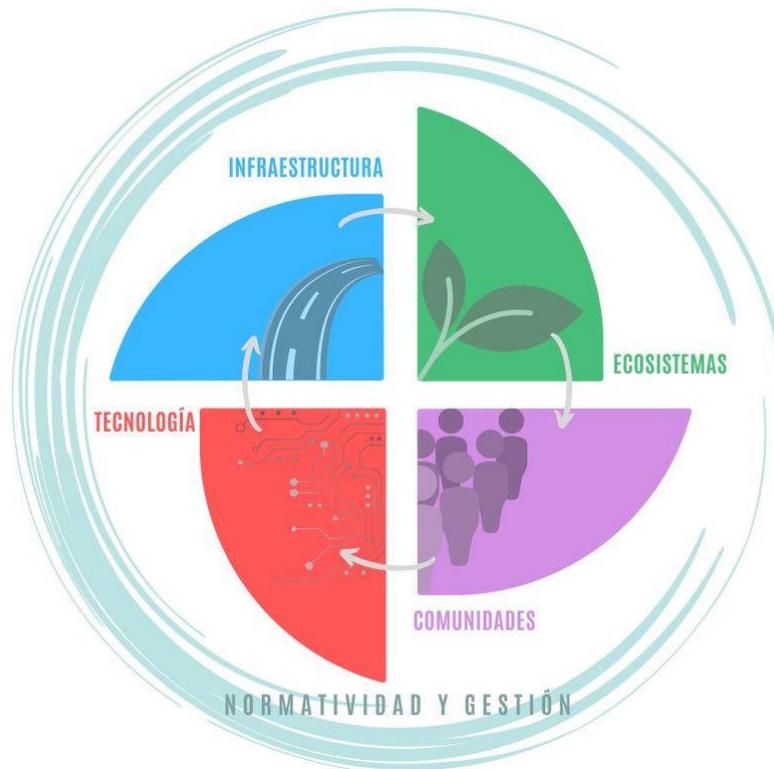
Figura 3.1 Mapa de una misión para adaptar los caminos rurales y alimentadores al cambio climático

3.2 Adaptación basada en comunidades

La Estrategia Prioritaria 1.5, del Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024, consiste en: proteger la infraestructura estratégica del país mediante la integración de criterios de adaptación en las fases de diseño, construcción, reconstrucción, mantenimiento y operación, para fortalecer su resistencia ante impactos del cambio climático.

Para lograr la integración de criterios de adaptación en las fases de diseño, construcción, reconstrucción, mantenimiento y operación de los caminos rurales y alimentadores, es importante integrar a las comunidades. Dicho acercamiento integral debe tomar en cuenta lo mejor de sus conocimientos tradicionales, así como de las técnicas innovadoras que se puedan implementar.

Por lo que se recomienda integrar a las comunidades en el proceso de adaptación, que, en conjunto con la integración del enfoque a la infraestructura, a los ecosistemas, a la tecnología, así como a la normatividad y gestión, permiten tener una visión integral (ver Figura 3.2).



Fuente: Basada en Ministerio de Transporte de Colombia (2014).

Figura 3.2 Enfoques de adaptación al cambio climático

La adaptación de la infraestructura consiste en modificar el proceso de diseño de las estructuras teniendo en cuenta periodos de retorno más amplios y escenarios de riesgo que deriven de estos (Ministerio de Transporte de Colombia, 2014).

Una adaptación basada en ecosistemas integra el uso de la biodiversidad y de los servicios eco-sistémicos como parte de una estrategia general de adaptación, la cual ayuda a las personas a adaptarse antes los impactos adversos del cambio climático.

Una adaptación basada en tecnología busca que tanto los sectores como la comunidad y el gobierno estén informados en todo momento, lo que permite, entre otras cosas, generar los sistemas de alerta temprana. Este elemento es de suma importancia para ejecutar la acción puntual 1.1.6 “Coordinar y promover el establecimiento de un sistema de alerta temprana ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos, así como el fortalecimiento de protocolos de prevención y atención para proteger a la población, la infraestructura estratégica y los sistemas productivos”, del Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024.

La normatividad y gestión es la parte integradora y se refiere al tipo de medidas que pueden habilitar y/o restringir las soluciones propuestas por los otros enfoques de la adaptación e implica la modificación de las especificaciones técnicas, normativas y regulatorias relacionadas con: (i) la planificación del mantenimiento de los caminos; (ii) los términos de referencia de los contratos que se ocupan en cada etapa del ciclo de vida de los caminos; (iii) la articulación de la planificación de los caminos con el ordenamiento territorial y los usos del suelo; (iv) la gestión ambiental, de los ecosistemas y de sus servicios (Ministerio de Transporte de Colombia, 2014).

Por ejemplo, el Gobierno de Nicaragua, a través de su “Guía metodológica y diseños típicos de obras para caminos vecinales como medidas de reducción del riesgo a desastre y adaptación al cambio climático”¹⁴ pretende apoyar a las alcaldías a resolver algunos de los problemas detectados en los caminos vecinales del país, todo ello con un enfoque de adaptación al cambio climático.

En la guía, antes mencionada, se especifican puntos que le proporcionan bastante relevancia al balance político-técnico-social para el

¹⁴ Elaborada por la Dirección de Preinversión, de la Dirección General de Inversiones Públicas, del Ministerio de Hacienda y Crédito Público, de Nicaragua.

mantenimiento, que a su vez abona a la sostenibilidad y resiliencia. Este punto es alcanzado al disponer de un marco metodológico, en donde se contempla una fase inicial intervencionista, en relación a legislaciones y procesos existentes en el orden social *per se*; iniciando por contemplar una selección y caracterización de las regiones afectadas, para así proseguir a generar canales de diálogo con los tomadores de decisiones y los gobiernos competentes al área de trabajo; lo cual, permite finalmente el enfoque hacia la reducción del riesgo de desastres, de forma inmediata, y como elemento de planeación futura, en relación a la adaptación al cambio climático.

3.2.1 Intervención de las comunidades en pequeños proyectos de rehabilitación de caminos

El Instituto Mexicano del Transporte llevó a cabo un estudio piloto en el estado de Querétaro donde se aplicó una metodología llamada “Juego de herramientas para promover la sostenibilidad de la infraestructura de transporte rural” (IFRTD-COSUDE, 2003) en la comunidad rural de bajos ingresos de Los Pinos¹⁵, en México, para diseñar e implementar un proyecto que permitiera rehabilitar o dar mantenimiento a la infraestructura de transporte rural, de pequeña escala o comunal, así como estimular un proceso de planificación participativa (Balbuena y Ascencio, 2015).

El juego de herramientas requiere un buen entendimiento de las relaciones político-sociales entre los grupos de interés, y promueve el reconocimiento de la interdependencia entre la rehabilitación y el mantenimiento como una condición para la sostenibilidad del proyecto. El juego de herramientas está diseñado para:

- a) Analizar las fortalezas y debilidades de situaciones prácticas, poniendo énfasis sobre las condiciones locales.
- b) Evitar los errores comunes y las dificultades encontradas durante la rehabilitación de infraestructuras.
- c) Hacer preguntas relevantes para formular opciones viables, evitando definir objetivos irreales o ambiciosos.

¹⁵ La cual se localiza en plena montaña al noroeste de la cabecera municipal de Pinal de Amoles, en el estado de Querétaro, a una distancia aproximada de 34.5 kilómetros, la cual se puede recorrer en una camioneta 4x4 en dos horas (sólo de ida) a través de 10 kilómetros de carretera pavimentada en buenas condiciones y 24.5 kilómetros de camino rural de terracería, que en general está en malas condiciones.

- d) Establecer los criterios para seleccionar una solución entre las diferentes opciones existentes;
- e) Conducir un proceso participativo abierto para tratar todos estos puntos.

El juego de herramientas propugna intervenciones (proyectos) que abarquen los siguientes cinco elementos:

- 1) La promoción del sentido de propiedad local del proyecto para asegurar la sostenibilidad.
- 2) La participación de los grupos de interés locales (públicos y privados) en el proceso de diseño del proyecto de rehabilitación o mantenimiento, así como su financiamiento y ejecución.
- 3) Dos metas concurrentes:
Meta 1: Rehabilitación adecuada de la infraestructura de transporte rural.
Meta 2: Funcionamiento efectivo y permanente de un sistema de mantenimiento.
- 4) Reconocimiento de la interdependencia entre las dos metas, a través de la inclusión de consideraciones de mantenimiento en la etapa inicial de planificación de la intervención (proyecto). Esta es la razón de que el juego de herramientas haga continua referencia a los 'proyectos de rehabilitación/mantenimiento'.
- 5) Las condiciones locales se han de considerar en la definición de los proyectos de rehabilitación o mantenimiento, así como las fortalezas y debilidades de cada situación individual.

El enfoque del juego de herramientas consiste en llevar a cabo cuatro etapas, donde cada etapa de análisis se integra con una serie de preguntas que permiten una planificación participativa efectiva (comunidad-autoridades locales) sobre el proyecto a diseñar:

- Etapa 1 Los grupos de interés acuerdan iniciar el proceso de planificación.
- Etapa 2 Definición de la rehabilitación apropiada de una infraestructura en deterioro.
- Etapa 3: Definición de una estrategia apropiada de mantenimiento.
- Etapa 4: Redefinir quién de los grupos de interés ejecutará el proyecto de rehabilitación o mantenimiento.

El proyecto piloto logró cumplir con los siguientes objetivos:

- Los comuneros, a través del uso paso a paso del juego de herramientas, elaboraron su proyecto de rehabilitación o

mantenimiento de varios puntos críticos de su camino rural. Lo que ayuda a la sostenibilidad económica y social del proyecto de infraestructura.

- La aplicación de la herramienta permitió poner en el centro de dicho análisis a las necesidades de movilidad y accesibilidad de la comunidad rural.
- Estimular un proceso de planificación participativa (comunidad-autoridades locales y federales). Dicho proceso se centró en guiar a los comuneros en el diseño de un proyecto local con aportación de recursos de la misma comunidad, puesto que no tendrían apoyo financiero “externo”.
- Generar el sentido de propiedad del proyecto local entre los comuneros, con lo cual se garantiza su participación en la planificación y ejecución de dicho proyecto. Mismo que consistió en rehabilitar 70 metros de camino rural con técnica de empedrado, donde en temporada de lluvias era el lugar donde el camino se volvía inaccesible. Y acordaron, que a través de faenas la misma comunidad tendría la capacidad para dar mantenimiento al empedrado, ya que disponen de mano de obra capacitada, herramientas y material.

Para que el enfoque de sostenibilidad sea completo, se recomienda que en este tipo de herramientas se incorporen elementos para lograr la sostenibilidad ambiental, así como aumentar la capacidad adaptativa ante el cambio climático.

4. Marco para la adaptación de caminos rurales y alimentadores

Este apartado ha sido desarrollado para ayudar a los ingenieros de carreteras que operan y mantienen la infraestructura carretera rural y alimentadora en cada uno de los Centros SICT, y otros organismos de carreteras del país, en el proceso de adaptación al cambio climático, así como para que la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes emita las políticas necesarias en el sector.

El objetivo de este Marco es hacer frente a los impactos del clima que se han presentado en México y que han impactado a las carreteras, con base en análisis específicos.

El capítulo 2 del presente documento proporciona conocimiento de cómo los cambios en el clima y los fenómenos meteorológicos extremos están afectando la infraestructura carretera en el país, y cómo podría afectarla en el futuro, de tal manera que al conocer los efectos en los diferentes elementos del camino se pueda responder adecuadamente, a través de la implementación de acciones de adaptación.

La adaptación para las carreteras implica acciones que permitirán que la infraestructura permanezca operando bajo la presencia de fenómenos climáticos extremos y sus efectos derivados, sin que resulten en fallas que repercuten en cierres parciales o totales de la vialidad.

El marco metodológico está desarrollado en varias etapas que les permitirán a los profesionales del sector considerar el cambio climático en sus actividades cotidianas, ya sea durante la planeación, construcción, operación y/o mantenimiento de las carreteras. Este procedimiento se encuentra basado en el “Marco Metodológico para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático en México”, elaborado por Mendoza et al. (2019).

El Marco propuesto establece una base sólida de planeación que permite a las organizaciones de carreteras establecer los objetivos y alcances de un proceso de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático, basados en la información disponible, la contextualización interna y

externa para la adaptación y, con ello, definir el producto entregable y las tareas necesarias para alcanzar el objetivo.

La SICT o cualquier organismo de carreteras a nivel estatal o municipal en México deberá considerar algunos aspectos básicos en la planeación, que permitan definir el objetivo del estudio de adaptación; acotar el alcance del análisis, establecer la escala de análisis, los activos relevantes, el alcance temporal, los impactos del cambio climático y las variables climáticas relevantes a incluir; precisar el contexto donde se llevará a cabo la adaptación; identificar los actores clave y grupos de interés, definir el producto entregable (producto resultante) y las tareas.

Posterior a la fase de planeación, el proceso de adaptación se realiza mediante las siguientes cinco etapas.

4.1 Identificación de riesgos

La primera etapa de identificación de riesgos está basada en dos enfoques, el primero para analizar toda la red que pudiera estar en riesgo y el segundo en identificar los sitios de riesgo en los tramos carreteros previamente analizados.

Para analizar una red carretera se utiliza un enfoque de arriba hacia abajo, mediante la técnica de superposición de capas de información georreferenciada, donde los mapas de exposición al cambio climático, ya sea general o por variables climáticas, tales como inundación, precipitación intensa, aumento de temperatura, etc., se superpongan a la red de carreteras para identificar los activos que podrían ser vulnerables ante los diferentes fenómenos asociados al cambio climático.

Este proceso de arriba hacia abajo es posible hacerlo también para índices de peligro, tales como ondas de calor, etc. Así como para mapas de exposición de lluvias intensas, inundaciones, marejadas, deslizamientos, aluviones, avenidas torrenciales, vendavales, granizadas, ondas frías, heladas, nevadas, neblinas, tempestades, sequía, incendios forestales, etc. Y también para escenarios futuros de temperatura, precipitación y aumento del nivel del mar.

Una vez identificadas las áreas vulnerables, y cuantificados los tramos carreteros, se requiere trabajo de campo para evaluar la vulnerabilidad de los activos, para ello se utiliza un enfoque de abajo hacia arriba.

El proceso para la identificación de activos con un enfoque de abajo hacia arriba se realiza a través de trabajos de campo y gabinete, los cuales mediante recorridos en toda la red de carreteras de cada estado se

identifican puntos de riesgo en diversos elementos que conforman la carretera, tales como puentes, alcantarillas, taludes de corte o terraplén, pavimentos, etc. Cada sitio identificado debe ser georreferenciado y mapeado sobre la red de carreteras para su localización y evaluación.

El combinar la experiencia de la brigada de campo con la de los ingenieros locales y las comunidades es muy importante, pues el conocimiento de los segundos permite facilitar la identificación de riesgos y su valoración, ya que cuentan con información histórica, es decir, de eventos anteriores donde se han registrado afectaciones.

4.2 Evaluación de la vulnerabilidad

Las evaluaciones de vulnerabilidad permiten identificar la naturaleza y el grado en el que el cambio climático puede afectar a un sector, tal como el transporte. La evaluación de la vulnerabilidad es un componente central dentro del proceso de adaptación, pues la información que proporciona esta evaluación permite diseñar medidas que minimicen o eviten el daño. Para aplicar el concepto de vulnerabilidad es necesario cuantificarlo/medirlo para evaluar el grado de vulnerabilidad, por lo que es necesario establecer variables que permitan hacerlo.

La vulnerabilidad está en función del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático, así como la variación a la que un sistema está expuesto (exposición); y el grado en que se ve afectado algo, ya sea adversa o benéficamente, por estímulos relacionados con el clima (sensibilidad). La vulnerabilidad también está determinada por la capacidad de adaptación.

La exposición y la sensibilidad permiten determinar el nivel del impacto del cambio climático y, si se adiciona la capacidad de adaptación, se puede determinar el indicador de vulnerabilidad, el cual permite evaluar el nivel de vulnerabilidad de los sitios en riesgo.

La vulnerabilidad de una carretera depende en gran medida del cambio que pudiera tener al estar expuesta a un fenómeno climático y cómo responderá la infraestructura al estar sometida a dicho estrés climático, y como el sistema carretero puede reducir/eliminar el impacto potencial.

Para conocer con detalle cómo realizar un análisis de vulnerabilidad se puede hacer uso del “Marco Metodológico para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático en México” (Mendoza et al., 2019).

4.3 Análisis del riesgo

Para una organización de carreteras, la evaluación de riesgos permite conocer los riesgos y cómo estos pueden afectar la operación de una carretera, en el caso de materializarse. Comprender las consecuencias, en términos de una valoración de la gravedad y/o severidad de los impactos del cambio climático, permitiría tomar las decisiones más adecuadas para la atención de los riesgos en las carreteras.

Los métodos utilizados para analizar los riesgos pueden ser cualitativos, semicuantitativos o cuantitativos. El método a utilizar dependerá de la información disponible.

El análisis de riesgo consiste en determinar las consecuencias y las probabilidades para los eventos de riesgo identificados. La multiplicación de la probabilidad y las consecuencias determinan el nivel de riesgo y cómo estos pueden ser categorizados para su atención.

Para conocer con detalle cómo realizar un análisis de riesgos se puede hacer uso del “Marco Metodológico para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático en México”, elaborado por Mendoza et al. (2019).

4.4 Determinación de las medidas de adaptación

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

Este paso busca identificar la medida de adaptación conforme al riesgo identificado, por ejemplo, inundaciones.

Una vez elegida la medida de adaptación se debe diseñar/concebir la medida de adaptación óptima, que permite garantizar la resiliencia del activo carretero.

El conocimiento local y el involucramiento de las partes interesadas, son un factor clave para la identificación de las medidas de adaptación, su experiencia permite seleccionar medidas realistas y factibles que pueden asegurar un mayor éxito al ser sometidas a condiciones de estrés climático.

Posterior a ello, las posibles propuestas para la adaptación deben ser seleccionadas, para asegurar que cumplan con el objetivo. La selección

implica un proceso de análisis para asegurar que la medida identificada pueda lograr el alcance previsto para mitigar el efecto adverso del cambio climático.

4.5 Priorización de las medidas de adaptación

En todas las agencias de carreteras, la limitación de recursos reduce los alcances para incorporar todas las acciones de adaptación identificadas, para ello se requiere el uso de herramientas para seleccionar y priorizar las medidas de adaptación. Algunas herramientas pueden ser encontradas en el “Marco Metodológico para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático en México” (Mendoza et al., 2019).

La priorización apoya a los tomadores de decisiones para evaluar los proyectos de inversión y asignar prioridades para las medidas de adaptación seleccionadas, a través de criterios económicos, técnicos, sociales y ambientales.

4.6 Implementación y monitoreo

Finalmente, la última etapa del proceso es la implementación y monitoreo de las medidas de adaptación, basados en su capacidad de adaptación y el grado de resiliencia de la red o el activo carretero.

Es decir, cómo se puede realizar la incorporación de las medidas/acciones/respuestas de adaptación dentro de los programas de mantenimiento e inversión en las organizaciones de carreteras para garantizar el éxito del proceso de adaptación; y, posteriormente, se realiza el monitoreo, seguimiento y evaluación de las estrategias de adaptación, para medir el éxito de las medidas implementadas. Los resultados también se pueden usar para revisar y refinar periódicamente las estrategias y los procesos de adaptación.

El Marco metodológico propuesto busca ayudar a las organizaciones de carreteras a definir o establecer una visión sobre la adaptación al cambio climático, para que la dependencia pueda continuar prestando con calidad el servicio a los usuarios y a las cadenas logísticas en el transporte de mercancías, así como asegurar la comunicación a las comunidades a través de la red de caminos rurales y alimentadores.

Conclusiones

México cuenta con una gran extensión de carreteras rurales y alimentadoras, 72.7% del total de la red nacional en el año 2021, por lo que, uno de los grandes retos estriba en incluir criterios de adaptación al cambio climático en la conservación, mantenimiento, mejoramiento o reconstrucción de los caminos ya existentes, así como en el diseño de nuevos caminos, de tal manera que se logre aumentar su resiliencia al clima.

El cambio climático debe ser considerado como uno de los muchos riesgos que requieren atención para la toma de decisiones en el sector transporte, y no debe ser tratado como un tema independiente.

El personal de las administraciones de carreteras necesita información accesible y sólida, herramientas y guías para que puedan tomar decisiones informadas. El acceso a la información es clave para poder hacer mejores análisis y estimaciones de las variables futuras del clima, como temperatura y precipitación, por lo que seguirá siendo un reto proveer en plataformas, como el SICLiC, tanto de la información histórica con una escala detallada, cubriendo la mayor parte del territorio nacional, así como de los escenarios futuros de cambio climático para México, con una mayor escala. Además, sería muy útil que en la Red Nacional de Caminos (desarrollada por el INEGI, la SICT y el IMT) se incluya la clasificación de caminos alimentadores y rurales, para estos últimos sería necesario homologar el criterio con el de la SICT.

Los elementos que integran un camino, que fueron abordados, y las recomendaciones técnicas resultantes, corresponden a solo una parte del universo de elementos de infraestructura en el país y se plantean como secciones mínimas de revisión ante las buenas prácticas; dichas recomendaciones deben ser complementadas con estudios de ingeniería y experiencia técnica de ingenieros de campo, adicionando factores tales como los estudios y estructuras hidráulicas, zonas de adquisición y materiales regionales, mecánicas de suelos, etc.

Todo lo anterior podrá ser dispuesto ante un programa de priorización de acciones, planteando así estrategias tangibles para la solución de los problemas del cambio climático en México, con herramientas como el Marco Metodológico para la Adaptación de la Infraestructura Carretera

ante el Cambio Climático en México (Mendoza et al., 2019), donde, aunado a los segmentos agrupados previamente dispuestos, se podrán elaborar estrategias de optimización en la elección de presupuestos para las partidas de conservación y mantenimiento de los mismos.

Visto desde una perspectiva más amplia, se recomienda procurar la definición de una misión para la elaboración de estudios piloto que permitan desarrollar medidas específicas para las diversas zonas del país, de tal manera que las medidas de adaptación respondan a las circunstancias particulares de cada región. En los estudios piloto sería conveniente involucrar a las comunidades e integrar otros sectores, así como desarrollar las herramientas para la capacitación de los actores clave y de los ingenieros que intervienen en el diseño, construcción, mantenimiento, mejoramiento y rehabilitación de los caminos rurales y alimentadores en México.

Además, es importante que se genere un proceso de retroalimentación después de que hayan ocurrido fenómenos climáticos extremos, de tal manera que se recoja información sobre los daños que sufrió la infraestructura y se identifiquen los elementos de la misma que sí soportaron bien los impactos, tanto para caminos ya intervenidos con medidas de adaptación al cambio climático como para aquellos aún no intervenidos.

Para los caminos intervenidos, es importante evaluar las posibles medidas de adaptación con base en su efectividad para generar una mayor resiliencia a los cambios climáticos identificados.

Bibliografía

- Asociación Civil Argentina de Caminos Rurales Sustentables [AACRuS] (2022). *Caminos rurales sustentables, estudio de casos*. [Consulta en línea]. <https://www.aacrus.org.ar/>
- Balbuena, J. y Ascencio, J. (2015). *Sostenibilidad de la infraestructura de transporte rural. Estudio piloto, México* (Publicación Técnica No. 451). México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt451.pdf>
- Balbuena, J., Bustos, A., Zamora, A. y Ascencio, J. (2021). *Conservación y mantenimiento de caminos rurales y alimentadores con base en corredores locales de transporte*. (Publicación Técnica No. 658). México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt658.pdf>
- Banco Mundial (2019). *Construyendo resiliencia a eventos asociados al cambio climático en la red de caminos vecinales del Perú. Guía de análisis de riesgos climáticos y recomendaciones técnicas*. Lima, Perú.
- Berche, V. (2016). *Adaptation of transport infrastructures and networks to climate change*. PIARC Meeting Marrakech: Morocco
- Banco de Desarrollo de América Latina [CAF] (2018). *Guía de buenas prácticas para la adaptación de las carreteras al clima*. Corporación Andina de Fomento.
- Cedeño Plaza, D. G. (2013). *Investigación de la estabilización de suelos con enzima aplicado a la sub-rasante de la Avenida Quitumbe-Ñan, Cantón Quito*. [Tesis de grado]. Ecuador: Universidad Central de Ecuador.
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria [CEDRSSA] (2019). *Los caminos en los pueblos y comunidades rurales, y su impacto en el desarrollo rural sustentable*. Blog de opinión. [Consulta en línea]. http://www.cedrssa.gob.mx/post_los_-n-caminos-n-

[_en_los_pueblos_y_comunidades_rurales_y_-n-su_impacto-n_-en_el_desarrollo_rural_sustentable.htm](#)

- Chaignon, F. (2022). *Presentación de emulsiones asfálticas. Seminario de caminos rurales, 22 de junio 2022*. PIARC: Paraguay.
- Collazos, F., Parra-Ruiz, L. y Alonso Plá, M. (2022). Incremento de la resiliencia de las obras de tierra de las carreteras del Estado en el Norte de España. Lecciones aprendidas en el periodo 2011-2018. *Revista Rutas, 190*, PIARC, 35-43.
- Departamento de Caminos y Carreteras de Bangladesh (2001). *Construction Practices and Procedures Manual*. Ministerio de Comunicaciones. Gobierno de la República Popular de Bangladesh. Sarak Bhaban, Ramna, Dhaca: Bangladesh.
- Dirección General de Planeación [DGP] (2022). *Estadística mensual del Sector Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, agosto 2022*. México: Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. Gobierno de México.
- Dutrénit, G., Natera, J., Vera-Cruz, A.; Penna, C. y Radaelli, V. (2021). *Capacidades institucionales en políticas de innovación orientadas por misiones en México*. Washington, D.C, USA: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Fernández, S. y Pérez, C. (2015). *Guerrero, el reto de una reconstrucción, caminos rurales y alimentadores*. México: Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes.
- Foro Internacional para el Transporte Rural y el Desarrollo [IFRTD] y Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación [COSUDE] (2003). *Juego de herramientas para promover la sostenibilidad de la infraestructura de transporte rural*. Londres, Inglaterra: IFRTD y COSUDE.
- 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>
- Grupo de Trabajo I del 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. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

- Hunter, R., Self, A. y Read, J. (2015). *The Shell Bitumen Handbook*. (6a ed.). Bristol, Reino Unido: Shell International Petroleum Company Ltd..
- 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.
- Lesueur, D. (2020). *Procedimiento de preparación de revestimientos bituminosos en frío*. (Patente Internacional. No. PCT/EP2015/065880). Lhoist Recherche Et Developpement S.A. España: Oficinas Españolas de Patentes y Marcas.
- MacLeod, D.R. y Hindinger, W. (2008). *Asset Management of Gravel Airstrips in The Yukon Canada*. Conference on Managing Pavement Assets: Calgary, Canada.
- Mazzucato, M. (2018). *Mission-oriented research & innovation in the European Union. A problem-solving approach to fuel innovation-led growth*. Bruselas, Bélgica: Comisión Europea.
- Mazzucato, M. y Penna, C. (2020). *La era de las misiones. ¿Cómo abordar los desafíos sociales mediante políticas de innovación orientadas por misiones en América Latina y el Caribe?* Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Mendoza, J., Marcos, O. y Héctor, O. (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>
- Ministerio de Transporte de Colombia (2014). *Plan Vías-CC: vías compatibles con el clima, plan de adaptación de la red vial primaria de Colombia*. Bogotá, Colombia: MINTRANSPORTE.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones [MOPC] (1990). *Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (catálogo de fallas)*. República Dominicana: Departamento de

Administración y Evaluación de Pavimentos, Gobierno de República Dominicana.

Pérez, G. (2020). Caminos rurales: vías claves para la producción, la conectividad y el desarrollo territorial. *Boletín FAL*, 377. Santiago, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Asociación Mundial de la Carretera [PIARC] (2020). *Preserve earthworks and rural roads from the impact of climate changes*. Technical committee D.4 "Earth works and rural roads". París, Francia: Asociación Mundial de la Carretera. ISBN: 978-2-84060-626-0.

Rübbelke, D. (2011). International support of climate change policies in developing countries: strategic, moral and fairness aspects. *Ecological Economics*, 70, 1470–1480.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT] (2018). *Manual de proyecto geométrico de carreteras*. (3ª ed.). México: Dirección General de Servicios Técnicos.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT] (2021a). *Anuario Estadístico del Sector Infraestructura, Comunicaciones y Transportes 2021*. México: Gobierno de México.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT] (2021b). *Manual de revegetación y reforestación en la infraestructura carretera*. México: Dirección General de Servicios Técnicos, Subsecretaría de Infraestructura.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT] (2021c). *Manual de planeación, diseño e implementación de infraestructura verde vial*. México: Dirección General de Servicios Técnicos, Subsecretaría de Infraestructura.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT] (2021a). *Normativa para la Infraestructura del Transporte. Construcción; Carreteras; Conceptos de Obra; Terracerías; Terraplenes Tratados con Cal* (N-CTR-CAR-1-01-018/21). México: Subsecretaría de Infraestructura.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT] (2021b). *Normativa para la Infraestructura del Transporte. Características de los Materiales; Materiales para Pavimentos; Materiales para Subbases y Bases; Materiales para Subbases* (N-CMT-4-02-001/21). México: Subsecretaría de Infraestructura.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT] (2013). *Normativa para la Infraestructura del Transporte. Características de los Materiales; Materiales Diversos; Geosintéticos; Geotextiles para Terracerías* (N-CMT-6-01-001/13). México: SCT.

Washington State Department of Transportation [WSDOT] (2019). *Lesson 10: Culvert and Ditch Design (HM Chpt 3 & 4). Hydraulics & hydrology training*. Washington D.C., United States of America: WSDOT.



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/>