

PERÚ



Guía técnica de soluciones e innovaciones tecnológicas

para la mejora de caminos de bajo volumen de tráfico en Perú

Título: Guía técnica de soluciones e innovaciones tecnológicas para la mejora de caminos de bajo volumen de tráfico en Perú

Este documento ha sido publicado bajo la Presidencia Ejecutiva de Sergio Díaz-Granados y la Vicepresidencia Corporativa de Programación Estratégica de Christian Asinelli.

Autor

J. Waldo Márquez Subieta

Gerencia de infraestructura para el desarrollo

Dirección de transporte y logística

Gestión editorial

Dirección de Comunicación Estratégica de CAF

Edición y corrección

Rafael Osío Cabrices

Diseño gráfico

Cleiman

© CAF 2025

Las ideas y planteamientos contenidos en este documento son de exclusiva responsabilidad de los autores y no comprometen la posición oficial de CAF. Los términos empleados y la presentación de los datos que en ella aparecen no implican toma alguna de posición por parte de CAF en cuanto al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o regiones ni respecto de sus autoridades, fronteras o límites.

Acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional (CC-BY-NC-ND 4.0). Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



CAPÍTULO 1	
Introducción	5
CAPÍTULO 2	
Marco de la infraestructura vial rural de Perú	16
CAPÍTULO 3	
Sostenibilidad y economía circular en la infraestructura rural	26
CAPÍTULO 4	
Guía para el diseño geométrico y seguridad vial	41
CAPÍTULO 5	
Guía de drenaje en caminos de bajo volumen de tránsito	54
CAPÍTULO 6	
Guía de soluciones para la plataforma de rodadura: estabilizaciones y recubrimientos	67
CAPÍTULO 7	
Gestión de activos viales	91
CAPÍTULO 8	
Modelos de financiamiento y participación del sector privado	116
CAPÍTULO 9	
Conclusiones y recomendaciones	131
Referencias	142

Figura 1.	Mapa de la red vial de Perú	18
Figura 2.	Mapa de restricciones de transitabilidad por motivos climatológicos (mayo de 2025)	23
Figura 3.	Principios de la sostenibilidad aplicados a los CBVT	28
Figura 4.	Principios de la sostenibilidad ambiental aplicables a los CBVT	29
Figura 5.	Proceso de caracterización hidrológica	59
Figura 6.	Manual de gestión de activos de la Asociación Mundial de Carreteras	94
Tabla 1.	Evaluación Greenroad	38
Tabla 2.	Valores orientativos para radios mínimos para CBVT	45
Tabla 3.	Criterios para seleccionar la técnica de estabilización	83
Tabla 4.	Características de la macro y microtextura	106

CAPÍTULO

1



Introducción

CAPÍTULO 1

Introducción

En este capítulo se presenta una visión general y moderna sobre la importancia de los Caminos de Bajo Volumen de Tránsito (CBVT) en el desarrollo territorial de Perú, basada en referencias documentales y experiencias internacionales. Se aborda la definición de estos caminos, su valor estratégico para la conectividad rural y su impacto en la sociedad, así como la necesidad de soluciones innovadoras y sostenibles. Además, se analiza la interrelación entre los CBVT y el territorio, considerando los desafíos geográficos y climáticos de las regiones Costa, Sierra y Selva. Finalmente, se establecen los objetivos, el alcance de la guía y la metodología utilizada en su elaboración, fundamentada en la revisión de normativas, estudios comparativos y casos de éxito en la gestión de infraestructura vial rural.

Los CBVT son aquellas vías rurales que presentan un tráfico vehicular reducido, generalmente con una capa de rodadura de bajo costo o sin pavimentar. Su principal función es proveer conectividad básica y accesibilidad a poblaciones rurales, facilitando su integración con centros urbanos de mayor jerarquía y permitiendo el acceso a servicios esenciales como salud, educación y mercados, por lo que tienen especial relevancia para la economía de las poblaciones rurales.

CAMINO DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO (CBVT)



Foto del autor

En términos de volumen de tránsito, las definiciones varían según la normativa de cada país. A nivel global, la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC) y otros organismos han establecido valores de referencia que oscilan entre 50 y 400 vehículos diarios, dependiendo del tipo de superficie y la función de la vía. En el contexto peruano, los CBVT son aquellos caminos con un flujo vehicular promedio inferior a 400 vehículos diarios (MTC, 2008). Este umbral coincide con la clasificación utilizada en otras regiones de América Latina para diferenciar las vías de bajo tránsito de las carreteras interurbanas convencionales.

En muchos casos, los CBVT también se categorizan considerando su importancia funcional en la red vial, más allá del tráfico registrado. Desde este punto de vista, en Perú abarcan dos categorías principales dentro del sistema nacional vial:

- **Vías secundarias o departamentales:** son carreteras de rango intermedio que enlazan centros urbanos medianos con municipios más pequeños y zonas rurales.
- **Vías terciarias o vecinales:** conectan pequeñas localidades, caseríos y comunidades con la red vial principal. Se caracterizan por su diseño más flexible y menor nivel de servicio. Su mantenimiento está generalmente a cargo de gobiernos locales.

Los CBVT constituyen más del 70% de la infraestructura vial total en Perú. Desempeñan un papel determinante en la movilidad, la integración social y el desarrollo económico de millones de personas. Son la base del sistema de transporte en áreas rurales.

Se estima que existen aproximadamente 140.000 km de vías asociadas a esta categorización, de las que una gran proporción requiere mejoras urgentes en términos de transitabilidad y resistencia a condiciones climáticas extremas. Un alto porcentaje de la red de CVBT no está pavimentada y enfrenta un deterioro acelerado por la falta de inversiones en conservación.

Su relevancia no sólo radica en la conectividad territorial, sino también en su impacto en el desarrollo económico, la reducción de la pobreza y la seguridad alimentaria. Diversos estudios han demostrado que la inversión en caminos rurales tiene un alto retorno socioeconómico, ya que mejora las condiciones de vida de las poblaciones rurales, permite la integración de cadenas productivas y fortalece la descentralización del transporte.

En Perú, más del 40% de la población rural depende exclusivamente de caminos vecinales para acceder a servicios básicos. La falta de mantenimiento en los CBVT aumenta los costos y reduce la competitividad del sector agropecuario. Sin embargo, la limitada asignación de recursos para su mantenimiento y la ausencia de soluciones técnicas duraderas siguen siendo desafíos pendientes. La implementación de tecnologías innovadoras y prácticas sostenibles en su gestión es fundamental para garantizar su funcionalidad a largo plazo y su contribución efectiva a la integración territorial del país.

Los caminos rurales y la interrelación con la sociedad

En un país con una geografía altamente diversa y con comunidades aisladas en la Costa, la Sierra y la Selva, la conectividad vial es un factor crítico para el acceso a servicios esenciales, la reducción de la pobreza y la generación de oportunidades productivas.

Se estima que en Perú un porcentaje relevante de la población vive lejos de centros urbanos. La disponibilidad de una red vial en buen estado influye directamente en su acceso a atención médica, educación y seguridad alimentaria. En las zonas rurales de la Sierra y la Selva, llegar a centros de salud puede tomar un tiempo considerable en condiciones normales, y en la temporada de lluvias muchos caminos quedan intransitables, aislando completamente a las comunidades e incrementando los riesgos de salud materno-infantil, así como los de cualquier paciente que requiere atención de emergencia.

En Perú, miles de niños caminan diariamente longitudes relevantes para llegar a sus escuelas en zonas altoandinas y amazónicas. Cuando los caminos están en mal estado o intransitables, la asistencia escolar disminuye y, en muchos casos, los estudiantes deben abandonar sus estudios. La mejora de los CBVT permite la implementación de rutas escolares seguras, facilitando el acceso a la educación secundaria y reduciendo la deserción escolar en comunidades alejadas.

CAMINO AL CENTRO EDUCATIVO AL LADO DE UN CBVT



Cortesía FBK Ayacucho

Muchas comunidades rurales en Perú dependen de pequeños mercados locales para su abastecimiento diario. Sin caminos en buen estado, el transporte de alimentos y productos básicos es más costoso y menos frecuente, lo que incrementa los precios de los productos de primera necesidad en estas zonas. Además, los agricultores enfrentan dificultades para transportar sus cosechas a mercados regionales, limitando su capacidad productiva y de comercialización, y en ocasiones perdiendo sus productos.

Facilitar el transporte de productos agrícolas y ganaderos es impulsar la economía rural. El sector agrícola y ganadero representa el principal sustento de la población rural peruana, con porcentajes significativos del PIB nacional (Midagri 2017) y del empleo (INEI 2024). La precariedad de la infraestructura vial en las zonas productivas limita su crecimiento y sostenibilidad.

TRANSPORTE DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA



Foto del autor

En regiones como la Sierra y la Selva, los productores de café, cacao, papa y quinua enfrentan serias dificultades para trasladar sus productos a los mercados nacionales e internacionales debido a caminos en mal estado. Un estudio del Banco Mundial reveló que el costo logístico del transporte rural en Perú es hasta tres veces mayor que en países con infraestructura vial desarrollada, lo que reduce la competitividad de los pequeños productores, sobre todo en momentos en que se expanden los cultivos comerciales (palta, mango y arándanos, entre otros) por la demanda internacional. Muchas zonas agrícolas con alto potencial no pueden desarrollar estas cadenas

productivas porque el costo de transporte es alto o la calidad de las vías no permite el acceso de camiones de carga.

Las mejoras en CBVT han demostrado impactos económicos positivos en países con condiciones similares a las de Perú. Han aumentado el ingreso de las zonas productoras entre un 15% y un 20% al reducir el costo del transporte y ampliar las oportunidades de comercialización. Implementar estrategias similares en Perú permitiría potenciar el crecimiento del sector agrícola y mejorar la calidad de vida de miles de familias rurales (CEPAL 2020).

En Perú, el modelo de microempresas viales comunitarias ha sido implementado con éxito desde los años 90, con más de 800 microempresas operando en distintas regiones. Estas organizaciones, integradas por pobladores locales, se encargan del mantenimiento rutinario de caminos rurales, generando empleo y asegurando la sostenibilidad de la infraestructura. En los últimos años, diversos programas han promovido la inclusión de mujeres en el mantenimiento de caminos, mejorando su autonomía económica y fortaleciendo el tejido social de las comunidades.

Al mejorar la conectividad, la accesibilidad y las oportunidades económicas en las zonas rurales, los CBVT contribuyen a frenar la migración hacia las ciudades, reduciendo la sobrepoblación en áreas urbanas.

PERSONAL DE MICROEMPRESAS DE MANTENIMIENTO VIAL



Cortesía Perú Construye

La infraestructura vial rural, especialmente los CBVT, es clave para la equidad territorial y el desarrollo en el Perú. Una inversión insuficiente limita su funcionalidad y mantiene brechas sociales. Mejorarla, en cambio, impacta positivamente el bienestar y la economía local, lo que requiere enfoques técnicos innovadores y adaptados a las condiciones geográficas y climáticas del país.

La territorialidad y el impacto de los caminos

Debido a la diversidad de la geografía peruana, el impacto de estos caminos varía significativamente. Su construcción, mantenimiento y operación están influenciados por la topografía, el clima y otros factores sociales, económicos y ambientales, que han definido patrones de asentamiento, uso del suelo y acceso a oportunidades productivas.

A lo largo de las últimas décadas, la expansión de la red de CBVT en Perú ha contribuido a la integración territorial, pero también ha generado retos ambientales, conflictos de tenencia de tierras y riesgos climáticos que deben ser abordados con estrategias de planificación adecuadas. En este apartado, se analizan estos impactos diferenciados según la región, los desafíos que enfrentan los CBVT y las posibles soluciones adaptadas a cada contexto.

- **Costa: caminos vulnerables a fenómenos climáticos extremos.** La franja costera del Perú, que representa aproximadamente el 10% del territorio nacional pero alberga al 60% de la población, es una de las regiones más afectadas por la vulnerabilidad de su infraestructura vial ante eventos climáticos extremos, como el Fenómeno de El Niño. Las lluvias torrenciales generan crecidas de ríos y activación de quebradas, causando la destrucción total de caminos y puentes, lo que afecta la conectividad de miles de comunidades.

IMPACTO DEL FENÓMENO DE EL NIÑO EN ZONAS COSTERAS DEL PERÚ



Foto: MAPFRE

- **Sierra:** caminos en zonas de alta pendiente y suelos frágiles. En la región andina, que comprende aproximadamente el 30% del territorio peruano, los CBVT son esenciales para conectar comunidades altoandinas que en muchos casos se encuentran a más de 3.000 m.s.n.m. Sin embargo, las condiciones topográficas y climáticas hacen que estos caminos enfrenten grandes desafíos: pendientes mayores a 10%, deslizamientos o derrumbes, heladas y congelamiento del suelo (principalmente en zonas con altitudes superiores a los 4.000 m.s.n.m donde la temperatura llega a ser inferior a los -15°C) y dificultades y altos costos de mantenimiento por la baja densidad poblacional.

CAMINOS CON NIEVE EN ZONAS DE SIERRA DE PERÚ



Foto del autor

- **Región Selva:** caminos en condiciones de alta pluviosidad y suelos inestables. La Amazonía peruana, que ocupa el 60% del territorio nacional, presenta desafíos únicos para la infraestructura vial debido a su clima cálido y húmedo, sus suelos arcillosos de baja capacidad portante y la densa vegetación. La alta pluviosidad, mayor a 3.000 mm anuales, hace que los caminos sean intransitables en época de lluvias. Dado que las rutas atraviesan cientos de ríos y quebradas, es difícil que exista continuidad en las redes viales. La falta de puentes vehiculares adecuados hace que muchas comunidades dependan de cruces improvisados, lo que genera riesgos de seguridad y limita la conectividad. Otros factores afectan estas zonas debido a la deforestación ocasionada por actividades ilegales, con las que se abren senderos sin ningún tipo de consideraciones técnicas, ambientales y/o sociales.

ALTA PLUVIOSIDAD EN CAMINOS DE LA SELVA DE PERÚ



Foto: Infobae

El impacto de los CBVT en Perú es amplio y varía significativamente según la región. Mientras que en la Costa la principal amenaza proviene de los fenómenos climáticos extremos, en la Sierra la topografía accidentada y las condiciones extremas de temperatura representan los mayores desafíos. En la Selva, la alta pluviosidad, la falta de infraestructura complementaria y la deforestación no planificada afectan la funcionalidad. Para maximizar los beneficios de los CBVT y minimizar sus impactos negativos, es crucial adoptar enfoques de planificación adaptativa, priorizando soluciones innovadoras, sostenibles y ajustadas a las particularidades de cada territorio.

Pertinencia de soluciones innovadoras, tecnológicas, duraderas y sostenibles

La mejora de los CBVT en Perú es un desafío constante por las condiciones geográficas, climáticas y socioeconómicas que afectan su diseño, construcción y mantenimiento. Dado que es insuficiente la inversión para conservar esa amplia red vial rural, es preciso implementar soluciones innovadoras, sostenibles y de bajo costo para garantizar la operatividad a largo plazo.

A nivel internacional, diversas estrategias han sido implementadas en países con características similares a las del Perú, logrando avances significativos en la gestión de infraestructura vial rural. La aplicación de tecnologías emergentes, nuevos materiales, enfoques de mantenimiento comunitario y técnicas de construcción sostenibles ha permitido extender la vida útil de los caminos rurales y reducir los costos de rehabilitación. A continuación, algunas de las alternativas que podrían ser aplicables:

- uso de materiales innovadores y reciclados para la estabilización de suelos.
- tecnologías para la reducción del impacto ambiental en los CBVT, entre las que se puede identificar estrategias de mitigación para la reducción de huellas de carbono.
- modelos de mantenimiento por desempeño y participación comunitaria. El mantenimiento de los CBVT en Perú ha sido históricamente deficiente debido a la falta de planificación a largo plazo y la escasez de recursos financieros. Para abordar este problema, diversos países han implementado modelos de mantenimiento basado en desempeño, en los que los contratos no se basan en cantidades de obra ejecutada, sino en indicadores de calidad y nivel de servicio de la vía.
- uso de tecnologías digitales y sistemas de monitoreo. La digitalización del mantenimiento vial y la incorporación de herramientas de monitoreo en tiempo real están revolucionando la gestión de la infraestructura en varias partes del mundo. En Perú, la aplicación de estas tecnologías en caminos rurales todavía es incipiente, pero tiene un gran potencial para mejorar la eficiencia de la conservación vial.

Es esencial que Perú avance en la implementación de estrategias probadas, adecuándolas a su realidad local y fortaleciendo la planificación vial con un enfoque de resiliencia y sostenibilidad en todo su ciclo de vida.

Objetivo y alcance de la guía

El propósito de esta guía es proporcionar directrices técnicas para la planificación, construcción, mantenimiento y gestión de los CBVT en Perú, con base en experiencias exitosas nacionales e internacionales.

Su enfoque está dirigido a:

- Ingenieros y técnicos responsables del diseño y mantenimiento de caminos rurales que buscan metodologías de diseño y construcción de caminos rurales adaptadas a cada contexto regional.
- Autoridades municipales y regionales involucradas en la gestión vial que necesitan herramientas para la toma de decisiones y ejecución de proyectos viales en sus jurisdicciones.
- Organismos de financiamiento e inversión en infraestructura vial rural que contribuyen a formular políticas públicas y estrategias de inversión en infraestructura vial rural.
- Comunidades locales interesadas en participar en la mejora de sus caminos, y que hallarán en esta guía una defensa del involucramiento de la población en la conservación de los CBVT, fomentando la generación de empleo en actividades de mantenimiento.
- Investigadores y académicos que requieren información especializada como referencia técnica para estudios y desarrollos científicos en infraestructura vial rural.

La necesidad de una guía técnica específica para CBVT en Perú responde a múltiples desafíos identificados en la gestión de estas infraestructuras en los últimos años. Por ejemplo, la falta de estándares adaptados; actualmente, este tipo de caminos se construyen con criterios que no discriminan adecuadamente entre las características de cada región, lo que genera incompatibilidades en su calidad y desempeño. También se ha identificado que existe una débil institucionalidad ya que muchas entidades gubernamentales no cuentan con equipos técnicos especializados en la planificación y conservación de CBVT. Otro aspecto relevante está relacionado con las estrategias de financiamiento, pues la asignación de recursos para CBVT ha sido históricamente baja y no ha sido bien distribuida a lo largo del ciclo de vida de los proyectos de infraestructura vial. Por último, se busca mayor adaptabilidad de las vías al cambio climático ya que Perú es uno de los países más vulnerables a eventos climáticos extremos.

CAPÍTULO

2



Marco de la infraestructura vial rural de Perú

Guía técnica de soluciones e innovaciones tecnológicas
para la mejora de caminos de bajo volumen de tráfico en Perú

CAPÍTULO 2

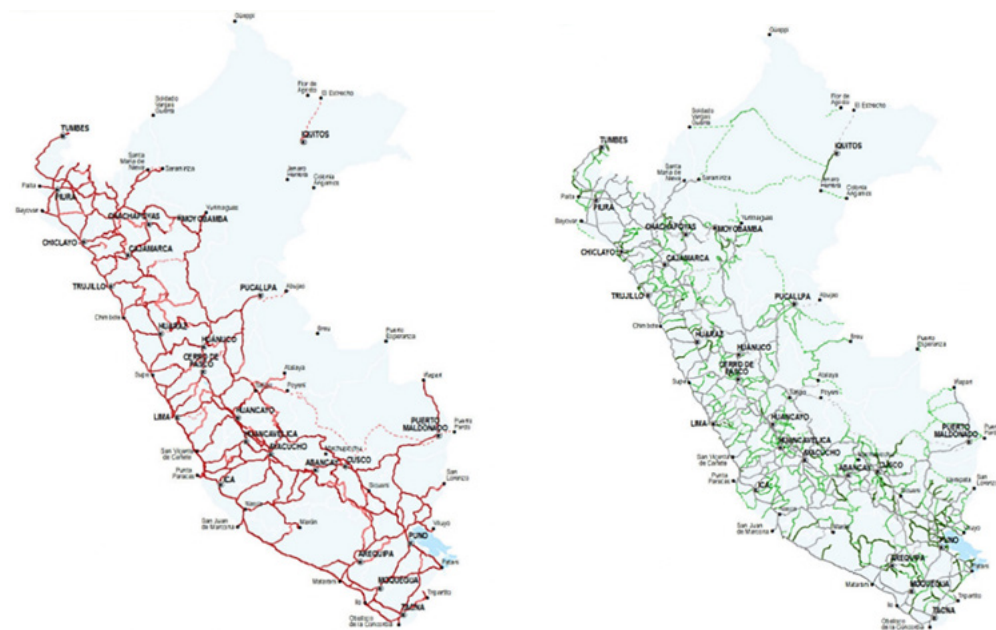
Marco de la infraestructura vial rural de Perú

En este capítulo se presenta un análisis detallado sobre la infraestructura vial en Perú, con especial atención a los CBVT. Se describe la extensión de la red rural y su relevancia dentro del sistema de transporte nacional, identificando sus principales desafíos. Se evalúa el estado actual de los CBVT, considerando aspectos como su nivel de transitabilidad y las principales problemáticas identificadas en su gestión. Asimismo, se analiza la influencia de las características geográficas y climáticas diferenciando las condiciones de Costa, Sierra y Selva. También se revisa la normatividad vigente en Perú, en particular regulaciones nacionales y estándares técnicos aplicables a caminos rurales. Finalmente, se realiza un *benchmarking* internacional, que compara las metodologías y estrategias exitosas en ALC en materia de la gestión y modernización de CBVT, con el objetivo de identificar oportunidades de mejora.

Extensión de la red vial rural

La infraestructura vial rural en Perú es uno de los componentes más extensos y estratégicamente relevantes del sistema de transporte nacional, caracterizado por el reto de garantizar conectividad en un territorio de tanta diversidad geográfica y climática.

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) y Provías Descentralizado, Perú cuenta con una red vial nacional de aproximadamente 178.800 kilómetros (según cifras de 2023), de los cuales una proporción mayoritaria –cercana al 82%– corresponde a caminos rurales o de bajo volumen de tránsito. Esta red rural está conformada principalmente por caminos departamentales y vecinales, que enlazan centros poblados, zonas agrícolas, escuelas, puestos de salud y mercados locales.

FIGURA 1. MAPA DE LA RED VIAL DE PERÚ**Red vial nacional****Red vial departamental****Red vial vecinal**

Fuente: MTC Anuario estadístico 2023.

Dentro de esta infraestructura rural, se consideran Caminos de Bajo Volumen de Tránsito (CBVT) a aquellos tramos cuya intensidad vehicular promedio diaria (IMD) es inferior a 200 vehículos por día, conforme a criterios técnicos nacionales e internacionales (MTC, Manual de Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2014). La red de CBVT en el Perú se estima en más de 130.000 kilómetros, incluyendo tanto caminos con solución básica, afirmado y trochas carrozables, como vías no clasificadas formalmente pero que cumplen funciones críticas de conectividad territorial.

La distribución de esta red rural presenta fuertes disparidades regionales, asociadas a factores geográficos, económicos y demográficos:

- En la Costa, los caminos rurales son menos extensos en proporción, pero cumplen un rol vital en el acceso a zonas agrícolas intensivas y zonas periurbanas en expansión.
- En la Sierra, donde predominan las condiciones de difícil topografía y fragmentación territorial, los CBVT representan la única vía de acceso para miles de comunidades altoandinas, muchas de las cuales se encuentran a más de 3.000 metros de altitud.
- En la Selva, los caminos rurales son fundamentales para conectar comunidades amazónicas, si bien su extensión efectiva es menor debido a la limitada cobertura terrestre y la presencia de ríos como vías naturales de comunicación.

Cabe destacar que la gestión y mantenimiento de esta extensa red recae principalmente sobre los gobiernos regionales y locales, con el acompañamiento técnico y financiero de programas nacionales como Provías Descentralizado, que desde su creación ha impulsado múltiples proyectos de mejora, mantenimiento y rehabilitación de caminos rurales, en articulación con estrategias de lucha contra la pobreza y promoción de la inclusión social.

Pese a su importancia, la formalización y el registro de la red rural presentan todavía desafíos significativos. Según el Inventario Nacional de Caminos (INC) actualizado hasta 2023, una proporción considerable de caminos rurales carece de clasificación oficial o tiene un levantamiento catastral insuficiente, lo que dificulta su gestión, la priorización de inversiones y la planificación del mantenimiento. En respuesta a este problema, el MTC, a través de la estrategia de “Consolidación del Sistema Nacional de Carreteras” y el fortalecimiento del Catastro Vial Nacional, viene impulsando procesos de actualización, digitalización y georreferenciación de la red, con especial énfasis en caminos rurales de acceso a comunidades.

En este contexto, la red vial rural de Perú, como entramado físico que sostiene la vida de las comunidades, la articulación del territorio, la cohesión social y el desarrollo productivo, encara retos importantes en términos de planificación, financiamiento, mantenimiento y resiliencia, que deben ser enfrentados mediante políticas públicas articuladas, participación comunitaria y estrategias de gestión innovadoras y sostenibles.

Características geográficas, climáticas y su impacto en la red de CBVT

Perú es uno de los países con mayor diversidad geográfica y climática de la región, lo que representa tanto una riqueza territorial como un desafío estructural para el desarrollo y sostenibilidad de su infraestructura vial rural. La red de CBVT, que conecta comunidades rurales en todo el país, se ve directamente influenciada por la complejidad del territorio, las condiciones topográficas extremas, la variabilidad climática y la fragilidad de los ecosistemas donde se insertan.

Cada una de las tres grandes regiones naturales –Costa, Sierra y Selva–, tiene particularidades técnicas que inciden en la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de los CBVT:

- **Costa: llanuras áridas y riesgo por eventos extremos.** La Costa peruana presenta características de baja pendiente, suelos arenosos o gravosos, y un clima predominantemente árido. La infraestructura vial presenta alta vulnerabilidad a eventos hidrometeorológicos extremos, como los generados por el Fenómeno El Niño, que pueden provocar lluvias torrenciales poco frecuentes pero de gran intensidad. Estas precipitaciones arrasan los caminos que no están preparados para escorrentías intensas. Los suelos altamente erosionables o colapsables requieren tratamientos especiales para evitar socavación y pérdida de plataforma vial. La expansión urbana desordenada en zonas periurbanas rurales genera presión sobre caminos vecinales sin estándares geométricos adecuados.
- **Sierra: topografía extrema y alta incidencia de deslizamientos.** La región andina constituye el entorno más desafiante para la infraestructura vial rural. Sus pendientes longitudinales y transversales pronunciadas requieren diseño geométrico cuidadoso. Hay una alta incidencia de deslizamientos y caídas de rocas, especialmente durante la temporada de lluvias, y es imperiosa la necesidad de soluciones de drenaje muy específicas, incluyendo cunetas revestidas, muros de contención y obras de bioingeniería.
- **Selva: suelos blandos y conectividad condicionada por lluvias.** La selva peruana, tanto en su zona alta como en la baja, presenta condiciones edafológicas y climáticas complejas para la infraestructura vial. La alta pluviosidad anual genera constantes interrupciones por anegamiento o colapso de calzadas. Los suelos blandos, arcillosos o de alta plasticidad tienen muy baja capacidad portante y alta sensibilidad a la saturación. Es limitada la disponibilidad de materiales granulares de calidad cercana al trazado vial, lo que incrementa los costos de construcción y mantenimiento y pérdida frecuente de la transitabilidad durante la estación húmeda, afectando la provisión de servicios y el comercio de productos agrícolas.

La infraestructura vial rural –especialmente los CBVT– es uno de los sectores más expuestos a los efectos del cambio climático. Según estudios recientes, se espera un aumento de la intensidad y frecuencia de eventos extremos (lluvias intensas, heladas, sequías) que deterioran rápidamente las condiciones estructurales de los caminos. Además, el cambio en los regímenes de precipitación altera los ciclos de mantenimiento, incrementa los costos de rehabilitación, y dificulta la programación de obras. En zonas altoandinas, por ejemplo, se observa el incremento de eventos de deslizamiento por saturación de taludes, mientras que en la selva se ha reportado una prolongación del periodo de lluvias, lo que reduce las ventanas de intervención.

En síntesis, las condiciones geográficas y climáticas del Perú imponen exigencias muy particulares al diseño y gestión de los CBVT. La variabilidad territorial exige soluciones diferenciadas por región, tanto en términos constructivos como en planificación del mantenimiento. Cualquier estrategia nacional de mejora o conservación de la red vial rural debe considerar este contexto como punto de partida, integrando herramientas de análisis territorial, modelado climático y planificación de riesgos para garantizar la funcionalidad, sostenibilidad y resiliencia de los caminos rurales.

Estado actual de los CBVT

El estado actual de los CBVT en Perú refleja una combinación de avances en cobertura y conectividad, junto con persistentes desafíos estructurales en materia de calidad, mantenimiento y resiliencia. A pesar de los esfuerzos impulsados por programas como Provías Descentralizado y el Programa de Infraestructura Vial para la Competitividad Regional, PROREGIÓN, una proporción significativa de los CBVT presenta condiciones de infraestructura deficientes o muy deficientes, lo que limita su funcionalidad como ejes de desarrollo rural.

De acuerdo con los datos disponibles del Inventario Nacional de Caminos (INC) y los informes de gestión de Provías Descentralizado (2023), se estima que una cantidad relevante de los caminos rurales presentan problemas estructurales o de transitabilidad, que incluyen:

- Superficies erosionadas o deformadas producto de la acción del tránsito combinado con fenómenos erosivos (agua de escorrentía, viento), especialmente en vías sin tratamientos de superficie o con afirmados de baja calidad.
- Sistemas de drenaje deteriorados o inexistentes, lo que provoca encharcamientos, socavaciones y aceleración del deterioro de la subrasante y la base de los caminos.
- Anchos de calzada inferiores a los estándares técnicos recomendados, lo cual afecta la seguridad vial y dificulta el paso simultáneo de vehículos en sentidos opuestos.

CAMINO EROSIONADO EN VÍAS AFIRMADAS

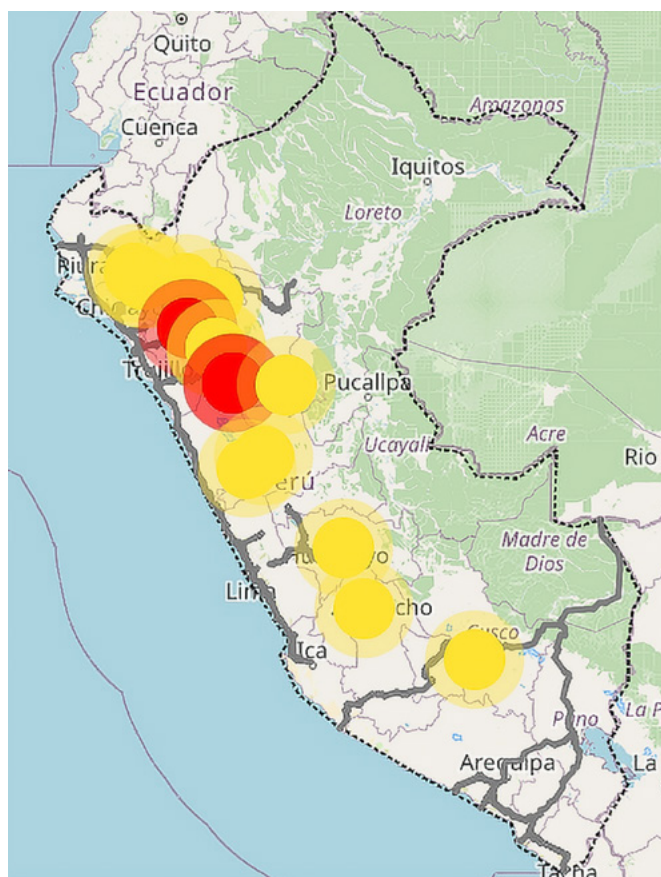


Foto: www.infoabe.com

Las principales causas de deterioro recurrente en los CBVT incluyen:

- Falta de mantenimiento rutinario oportuno. Muchos gobiernos locales carecen de recursos suficientes, equipos adecuados o capacidades técnicas para implementar programas de mantenimiento preventivo continuo, lo que genera una acumulación progresiva de daños.
- Impactos climáticos como lluvias intensas, desbordes fluviales, deslizamientos y heladas, que afectan principalmente a caminos en Selva y Sierra. El cambio climático ha intensificado estos fenómenos, aumentando la vulnerabilidad de las infraestructuras rurales.
- Uso de materiales inadecuados en la construcción original, que incrementan la vulnerabilidad de las vías a todo tipo de efectos, tanto asociados a las cargas como al clima.
- Incremento del tránsito vehicular pesado de las actividades productivas (minería, agroindustria) que no estaba previsto en el diseño inicial de los caminos rurales.

FIGURA 2. MAPA DE RESTRICCIONES DE TRANSITABILIDAD POR MOTIVOS CLIMATOLÓGICOS (MAYO DE 2025)



Legenda: Transito restringido ● Transito interrumpido ●

Fuente: Centro de Gestión y Monitoreo – SUTRAN

Desde el punto de vista de la transitabilidad, se calcula que aproximadamente el 30% de la red rural presenta problemas de acceso durante épocas lluviosas, particularmente en las regiones amazónicas y en zonas altoandinas expuestas a eventos climáticos extremos, con los correspondientes impactos en el acceso de las poblaciones a servicios de salud, educación y mercados, la calidad de vida y la productividad agrícola.

En cuanto a los avances, es importante destacar que diversas intervenciones recientes –financiadas a través de PROREGION y programas de mantenimiento periódico por desempeño o niveles de servicio– han permitido mejorar más de 20.000 km de caminos rurales en la última década, con énfasis en corredores productivos y de acceso a servicios esenciales. Sin embargo, la sostenibilidad de estas mejoras depende en gran medida de la capacidad institucional local para mantener los caminos en condiciones de servicio, la actualización periódica de los inventarios viales y la implementación de sistemas modernos de gestión de activos viales adaptados a las realidades de baja capacidad operativa.

Normatividad aplicable a caminos rurales en el Perú

La normativa técnica que rige el diseño, construcción, mantenimiento y gestión de la infraestructura vial rural en Perú ha sido formulada por el Estado a través del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), y operativizada por entidades especializadas como Provías Nacional y Provías Descentralizado. Su desarrollo responde a la necesidad de adaptar estándares técnicos a las condiciones geográficas y socioeconómicas del país, garantizando soluciones viables, de bajo costo y adecuadas al contexto rural. Sin embargo, a pesar de los avances normativos registrados en la última década, persisten vacíos regulatorios, falta de integración entre instrumentos, y desafíos para la aplicación uniforme en el ámbito regional y municipal. Esta situación limita la eficacia de las intervenciones y la sostenibilidad a largo plazo de la red rural.

El marco normativo para caminos rurales se compone actualmente de un conjunto de manuales técnicos, guías operativas y especificaciones complementarias, que se creó en el marco de políticas públicas, programas de cooperación y experiencias. Estos instrumentos han sido clave para estandarizar criterios de diseño, mantenimiento y gestión por desempeño.

A pesar del acervo normativo disponible, su implementación presenta múltiples obstáculos, especialmente en zonas rurales de baja capacidad institucional:

- **Desactualización técnica.** Muchos documentos aún no incorporan conceptos de resiliencia climática y economía circular, entre otros, lo que limita su alineamiento con estándares internacionales modernos.
- **Falta de integración normativa.** Existen solapamientos, vacíos o discrepancias entre las distintas normativas, lo que genera ambigüedad operativa para equipos técnicos subnacionales y empresas contratistas.
- **Capacidad técnica limitada en municipios y gobiernos regionales.** La comprensión, interpretación y aplicación de normas técnicas requiere capacidades que muchas veces no están presentes a nivel local, lo que conduce a diseños incorrectos, sub-ejecuciones presupuestales o mantenimiento inadecuado.
- **Ausencia de normativas orientadas a la gestión comunitaria.** Aunque existen microempresas comunales y modelos exitosos de gestión colaborativa, no existe una norma técnica estandarizada que regule sus operaciones, garantice calidad y formalice procedimientos.

Resulta recomendable avanzar en la actualización y fortalecimiento del marco normativo en los siguientes aspectos clave:

- **Revisión y actualización periódica de manuales técnicos,** para integrar enfoques modernos que tengan en cuenta el cambio climático, soluciones de economía circular y otras que permitan desarrollar proyectos con altos estándares de resiliencia.

- Desarrollo de guías operativas simplificadas para gobiernos locales, con fichas por tipología de intervención, catálogos de soluciones constructivas y herramientas digitales (GIS, plataformas web) de acceso libre.
- Inclusión de normativas sobre materiales innovadores y alternativos que hayan sido objeto de validación técnica, como subproductos industriales (cenizas, escorias) y agrícolas, y sobre otras técnicas aplicables a los distintos elementos de los CBVT.
- Implementación de un sistema normativo adaptativo, con especificaciones diferenciadas por zona geográfica (Costa, Sierra, Selva), volumen de tránsito y grado de vulnerabilidad climática.
- Normativa específica para gestión colaborativa y mantenimiento por desempeño, que establezca condiciones contractuales, protocolos de calidad, y mecanismos de verificación y control en contextos comunitarios o de baja escala.

La normatividad peruana dispone de un conjunto útil de reglas para el desarrollo de infraestructura vial rural, pero enfrenta el reto urgente de articular, actualizar y descentralizar su aplicación. Mejorar estas normas y su implementación es esencial para que los CBVT cumplan adecuadamente su función social, económica y territorial, bajo criterios de sostenibilidad, equidad y eficiencia operativa.

CAPÍTULO

3



Sostenibilidad y economía circular en la infraestructura rural

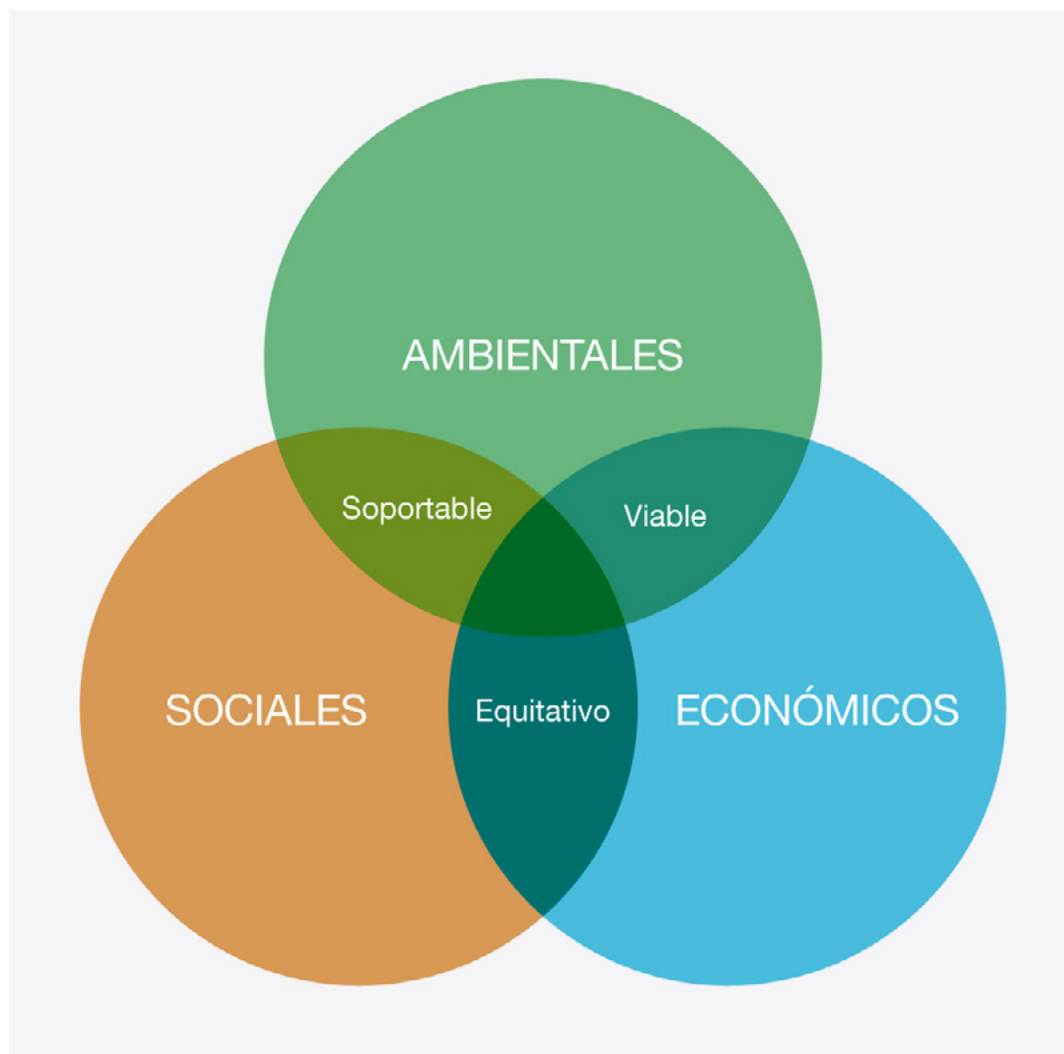
CAPÍTULO 3

Sostenibilidad y economía circular en la infraestructura rural

En este capítulo se aborda la importancia de la sostenibilidad y la economía circular en la planificación, construcción y mantenimiento de los CBVT en Perú. Se presentan los principios de sostenibilidad aplicados a la infraestructura vial rural, incluyendo estrategias para minimizar el impacto ambiental, optimizar el uso de recursos y mejorar la resiliencia de las vías frente a condiciones climáticas adversas. Se analiza cómo estos principios pueden ser integrados en todas las etapas del ciclo de vida de la infraestructura vial, desde la selección de materiales y el diseño geométrico hasta la conservación y el mantenimiento. Además, se exploran técnicas de adaptación y mitigación en materia de ingeniería de pavimentos para vías rurales, estrategias para la aplicación de la economía circular en los CBVT, como el uso de materiales reciclados y residuos industriales, y la implementación de tecnologías que reduzcan la huella de carbono. Se incluye un apartado sobre las oportunidades y beneficios de integrar criterios de sostenibilidad, desde el marco normativo y el ciclo de vida de las obras de infraestructura vial, al incorporar ejemplos y conceptos metodológicos de conocimiento internacional como la metodología GreenRoads.

Principios de sostenibilidad aplicados

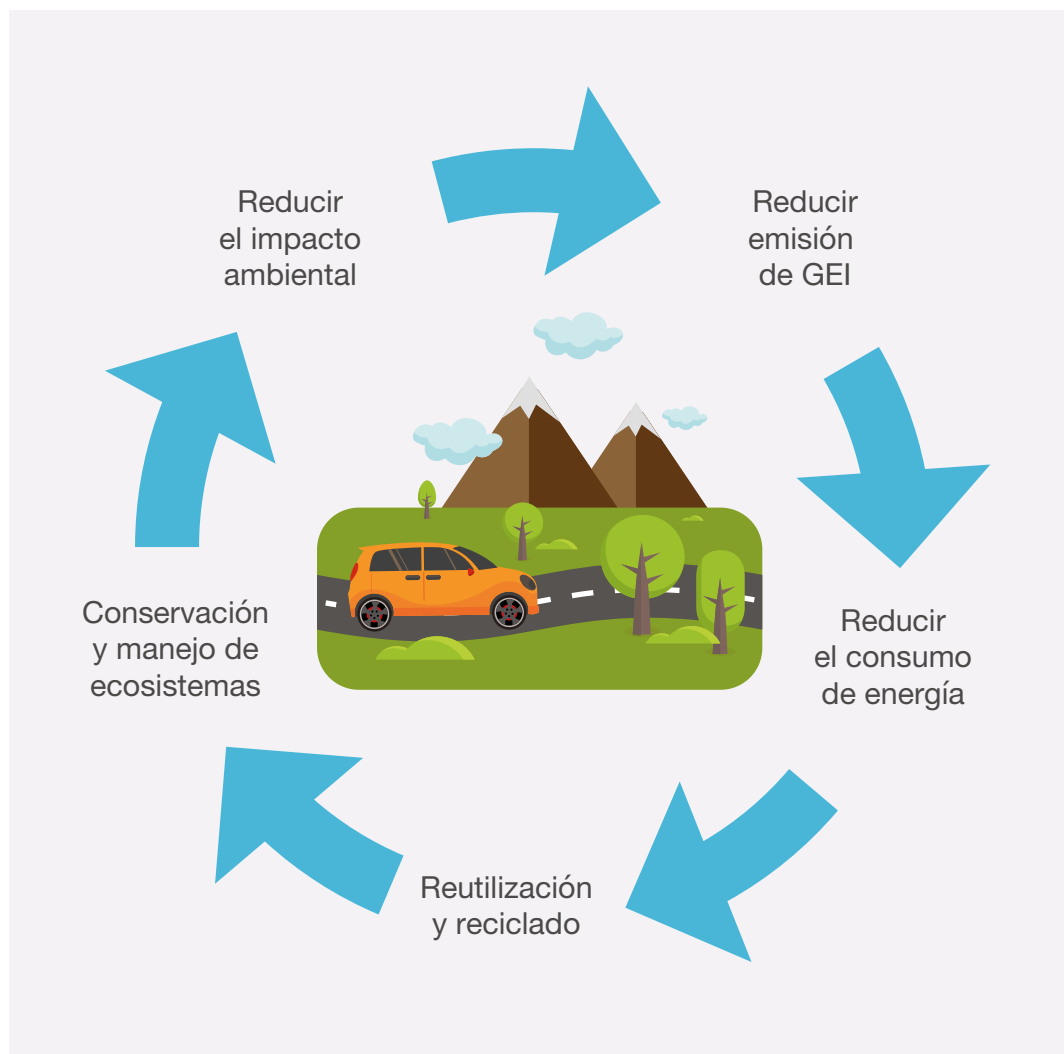
La sostenibilidad en el marco de la infraestructura vial rural implica la integración transversal y deliberada de criterios ambientales, sociales y económicos en todas las fases del ciclo de vida del proyecto, desde la planificación inicial hasta el mantenimiento y la eventual rehabilitación. No se trata únicamente de mejorar la conectividad física entre territorios, sino de asegurar que dicha conectividad se logre de forma resiliente, inclusiva, equitativa y ambientalmente responsable, maximizando los beneficios a largo plazo para las comunidades y reduciendo los impactos negativos sobre los ecosistemas (BID, 2013) (Banco Mundial, 2015).

FIGURA 3. PRINCIPIOS DE LA SOSTENIBILIDAD APLICADOS A LOS CBVT

Fuente: Elaboración propia

Este enfoque cobra una importancia estratégica en el contexto latinoamericano y particularmente en Perú, donde más del 70% de la red vial corresponde a CVBT (MTC, 2023), y cerca del 40% de la población nacional vive en áreas rurales, muchas de las cuales enfrentan altos niveles de pobreza y exclusión (INEI, 2022). Para millones de personas, los CBVT no son sólo infraestructuras de transporte, sino la única vía de acceso a servicios básicos.

Desde una perspectiva ambiental, incorporar criterios de sostenibilidad permite minimizar el impacto en los ecosistemas, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al uso de materiales tradicionales y al transporte de insumos (CAF, 2010), y reducir el consumo de energía y agua.

FIGURA 4. PRINCIPIOS DE LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL APLICABLES A LOS CBVT

Fuente: elaboración propia

A nivel social, significa diseñar infraestructuras que respondan a las necesidades reales de las comunidades, incorporando su participación activa en las decisiones y promoviendo modelos de gestión local que generen empleo y apropiación del territorio. En términos económicos, aplicar principios sostenibles permite reducir el costo total del ciclo de vida de los caminos, al priorizar soluciones duraderas, de fácil mantenimiento y adaptadas al entorno (Greenroads, 2020).

Por todo ello, los caminos rurales deben ser concebidos no como intervenciones aisladas de ingeniería, sino como elementos articuladores del desarrollo territorial sostenible, integrando el enfoque de sostenibilidad como eje rector para su planificación, diseño, construcción y gestión futura.

En este contexto, las tres dimensiones de la sostenibilidad son:

- **Sostenibilidad ambiental.** Con el objetivo de minimizar los impactos negativos sobre el entorno natural derivados de la planificación, construcción y mantenimiento de caminos rurales, esta dimensión de relevancia estratégica exige considerar criterios adecuados de prevención y mitigación desde el diseño inicial. Además, implica adoptar prácticas de economía circular que reduzcan la demanda de materiales vírgenes (CAF, 2010). Estas medidas, además de proteger el ambiente, contribuyen a la reducción de emisiones de GEI asociadas a la extracción, transporte y colocación de materiales.
- **Sostenibilidad social.** La sostenibilidad social de los caminos rurales implica garantizar su funcionalidad como infraestructura esencial para la vida cotidiana de comunidades rurales dispersas, muchas de las cuales dependen exclusivamente de estas vías para acceder a servicios básicos como salud, educación y mercados. Más que un ideal teórico, la sostenibilidad social se traduce en asegurar que los procesos de planificación, intervención y mantenimiento de estos caminos consideren activamente las dinámicas locales, las prioridades comunitarias y las condiciones socioterritoriales específicas. Ello requiere enfoques participativos viables, mecanismos de gestión comunitaria adaptados a realidades institucionales diversas y políticas públicas que reconozcan el rol de la infraestructura vial rural como un derecho habilitante para la inclusión, la movilidad y la equidad territorial.
- **Sostenibilidad económica.** Este componente busca asegurar que las soluciones viales sean económicamente viables en el largo plazo, es decir, que puedan mantenerse operativas sin requerir inversiones desproporcionadas o insostenibles para los gobiernos locales. Esto es crucial, dado que muchas entidades de administración locales responsables del mantenimiento de CBVT cuentan con recursos técnicos y presupuestales limitados.

Los principios técnicos claves para el desarrollo de la sostenibilidad en CVBT se detallan a continuación:

1. **Adaptación al entorno natural y social.** Es esencial diseñar caminos que se ajusten a la topografía, los tipos de suelo y el contexto local.
2. **Minimización del impacto ambiental.** Este principio, que consiste en tomar las medidas necesarias para reducir todo lo posible los efectos negativos en los ecosistemas, implica considerar por ejemplo el control de la erosión y la preservación de las fuentes de agua durante las etapas de construcción, así como la adopción de soluciones basadas en la naturaleza. Estas últimas han cobrado especial relevancia en los últimos años.
3. **Uso eficiente de recursos y materiales locales.** Uno de los aspectos más críticos en términos de sostenibilidad es el origen y la eficiencia en el uso de materiales. El transporte de materiales desde largas distancias no sólo eleva los costos del

proyecto, sino que aumenta la huella de carbono de la infraestructura vial. Por ello, los principios técnicos actuales promueven el uso de materiales locales disponibles, adaptando los diseños a las características de las zonas donde se estarán construyendo los caminos.

4. **Durabilidad y mantenimiento responsable.** En este principio, el concepto de durabilidad implica que una vía resista a las solicitaciones, pero también pueda entregar una adecuada funcionalidad a bajo costo y con mínima intervención. Los modelos como el mantenimiento por niveles de servicio (*performance-based maintenance*) o el establecimiento de microempresas comunitarias de conservación han sido aplicados con éxito en diversos países en desarrollo, con impactos positivos en la sostenibilidad operativa de la red y la generación de empleo rural (ILO, 2016).
5. **Resiliencia climática.** En caminos rurales, la exposición a lluvias intensas, temperaturas extremas, heladas o inundaciones puede comprometer severamente su operatividad y causar daños recurrentes. La infraestructura resiliente al clima es aquella diseñada para anticipar, absorber y recuperarse de los impactos derivados de los eventos climáticos.
6. **Análisis del ciclo de vida (ACV).** El enfoque de ciclo de vida permite evaluar el impacto ambiental, económico y social de un CVBT desde su diseño hasta el final de su vida útil. Este análisis ayuda a identificar opciones más sostenibles, incluso cuando los costos iniciales son mayores, ya que permiten menores requerimientos de mantenimiento y menor impacto ambiental acumulado (ISO 14040:2006). En este contexto es que surgen distintas metodologías como Greenroads, Envision o CEEQUAL, las cuales vienen promoviendo el uso del ACV en proyectos viales y la introducción de criterios de análisis y evaluación como la cantidad de emisiones de CO₂ del proyecto, la proporción del uso de recursos no renovables, la cantidad de energía incorporada en materiales, reciclaje y otros (Greenroads, 2020; ISI, 2021). Estas herramientas ayudan a los responsables de proyectos a tomar decisiones basadas en evidencia y a rendir cuentas sobre el desempeño sostenible de sus intervenciones.

Aplicación de los principios en las distintas etapas del desarrollo de la infraestructura vial

La incorporación de los principios de sostenibilidad en los CBVT debe plasmarse concretamente en cada etapa del ciclo de vida del proyecto. Desde la concepción inicial del camino hasta su operación, mantenimiento y eventual rehabilitación, existen oportunidades críticas para maximizar beneficios sociales, reducir impactos ambientales, asegurar la eficiencia económica y fortalecer la resiliencia territorial.

Para ello, identificar y comprender las fases clave del desarrollo de la infraestructura vial es fundamental para estructurar el marco de aplicación progresiva y sistémica de los enfoques de sostenibilidad. Esas fases son las siguientes:

1. **planificación:** análisis de necesidades y estudios de accesibilidad.
2. **diseño:** definición técnica del camino, selección de materiales y tecnologías.
3. **evaluación ambiental y social:** identificación de impactos, elaboración de planes de manejo y medidas de mitigación.
4. **financiamiento y preparación de la ejecución:** asignación de recursos, licitación y acuerdos de gestión.
5. **construcción:** ejecución física de las obras, gestión ambiental en obra, control de calidad y cumplimiento de estándares.
6. **operación y mantenimiento:** uso cotidiano del camino, monitoreo, conservación rutinaria y periódica.
7. **rehabilitación o clausura:** intervenciones mayores al final de la vida útil, reciclaje de materiales, evaluación post-uso.

Cada una de estas etapas ofrece puntos de entrada específicos para aplicar los principios de sostenibilidad y economía circular, y su correcta articulación garantiza que los CBVT no sólo cumplan su función básica de conectividad, sino que lo hagan de manera duradera, eficiente y armónica con el entorno y las comunidades.

A continuación, se presentan las principales fases del desarrollo de infraestructura vial y cómo incorporar de manera estructurada los principios de sostenibilidad y economía circular en cada una de ellas.

- **Fase de planificación.** En esta etapa se definen las necesidades, se seleccionan alternativas y se jerarquiza la ejecución de proyectos. Es el momento donde la sostenibilidad tiene mayor capacidad transformadora, ya que las decisiones tomadas aquí condicionan todo el ciclo de vida de la infraestructura. Aquí se pueden incorporar criterios de cambio climático, riesgos hidrometeorológicos, trazados y otro tipo de vulnerabilidades.
- **Fase de diseño.** El diseño técnico es la fase en la que se definen las características del camino (ancho, traza, pendientes, materiales, estructuras, drenaje, señalización, etc.). Una integración coherente de la sostenibilidad en esta etapa mejora el desempeño funcional, operacional y ambiental de la infraestructura, al tiempo que reduce costos futuros. En esta fase se pueden definir trazados que se adapten al entorno mediante soluciones de drenaje sostenibles, diseños resilientes, uso de materiales alternativos, economía circular y otras alternativas. Esta es también una etapa en la que se pueden

aplicar herramientas de análisis para evaluar impactos y comparar alternativas en términos de sostenibilidad.

- **Fase de construcción y ejecución de obras.** Durante esta etapa se materializa el proyecto, lo que conlleva una fuerte interacción con el entorno natural y social, además de un consumo intensivo de materiales y energía. Aplicar prácticas sostenibles en esta fase permite reducir los impactos negativos inmediatos y sentar las bases para una infraestructura de bajo impacto.
- **Fase de operación y de mantenimiento.** El mantenimiento es la fase crítica que garantiza la vida útil prolongada y segura de los caminos rurales, pero suele ser la más desatendida. Por esta razón es necesario incorporar principios de sostenibilidad y modelos de gestión que sean preventivos, eficientes y socialmente inclusivos. Un gran ejemplo son los proyectos por desempeño o de niveles de servicio, ya que favorecen que las intervenciones se realicen en el tiempo adecuado, de manera de acotar el impacto.

Estrategias de aplicación de la economía circular en CBVT

La economía circular es un modelo de producción y consumo que busca preservar el valor de los recursos durante el mayor tiempo posible, reduciendo la generación de residuos, reutilizando materiales y regenerando sistemas naturales (Ellen MacArthur, 2013). En el contexto de la infraestructura vial, este enfoque representa una ruptura con el modelo lineal tradicional de “extraer–construir–desechar”, y plantea nuevas formas de diseñar, construir, mantener y renovar caminos de forma más eficiente, sostenible y resiliente.

En los CBVT, la economía circular cobra especial relevancia, ya que permite optimizar el uso de recursos locales, reducir costos de construcción y mantenimiento, y minimizar impactos ambientales en territorios rurales que suelen ser más vulnerables ecológica y socialmente. A continuación, se detallan las principales estrategias y prácticas aplicables.

Reutilización y reciclaje de materiales

Una de las aplicaciones más concretas de la economía circular en caminos rurales es el reaprovechamiento de materiales, en lugar de depender exclusivamente de recursos vírgenes. Esto incluye:

- Reutilización de capas existentes en rehabilitación de caminos, mediante técnicas como reciclado *in situ*, con o sin adición de estabilizantes como cemento, cal, emulsiones o polímeros (PIARC, 2022).

RECICLAJE DE PAVIMENTOS



Foto: MotaEngil Perú

Uso de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD), que pueden emplearse en bases o sub-bases granulares, reduciendo la extracción de áridos naturales (OECD, 2020).

- Incorporación de pavimentos asfálticos reciclados (RAP por sus siglas en inglés) en mezclas tibias para capas de rodadura, especialmente en caminos rurales con bajo requerimiento estructural (FHWA, 2016).

FRESADO DE PAVIMENTO EXISTENTE PARA OBTENER RAP



Foto: www.ferreyros.com.pe

- Uso de neumáticos reciclados (polvo de caucho molido) para la modificación de asfaltos, y otras aplicaciones, como se ha hecho en varios países de ALC y el resto del mundo.

Estas estrategias permiten reducir significativamente la huella de carbono, disminuir el transporte de materiales, e incluso disminuir los costos en un 20%–30% en algunos contextos rurales (UNEP, 2019).

Incorporación de residuos industriales como insumos viales

Muchos países han avanzado en la valorización de residuos industriales como componentes de la infraestructura vial, dentro de marcos de economía circular. Algunas aplicaciones destacadas incluyen:

- Adición de cenizas volantes y escorias de alto horno para estabilización de suelos o producción de mezclas hidráulicas.
- Uso de plásticos reciclados como modificadores de asfalto, con lo que se han desarrollado rutas completas con asfalto modificado con plástico reciclado (ADB, 2020).

INCORPORACIÓN DE PLÁSTICO RECICLADOS EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS



Foto: Laname

- Aplicación de residuos agrícolas –como lignina, bagazo o fibras naturales– como refuerzo en mezclas bituminosas o tratamientos superficiales.

La adopción de estas técnicas requiere estudios de comportamiento mecánico, compatibilidad y durabilidad, pero la experiencia internacional muestra resultados muy prometedores tanto en caminos primarios como rurales.

Aplicación de técnicas de diseño para la reutilización

Un principio esencial de la economía circular es considerar la reutilización desde el diseño, es decir, planificar el desarrollo de las infraestructuras para que puedan ser fácilmente recicladas o transformadas en el futuro sin generar pasivos ambientales. En caminos rurales, esto se traduce en:

- Diseñar capas granulares y estructurales con materiales reutilizables o reciclables.
- Evitar el uso de mezclas o técnicas que impidan la recuperación futura del material (por ejemplo, cementación excesiva).
- Analizar la posibilidad de soluciones por capas fácilmente separables, como adoquines intertrabados o pavimentos articulados.

Como se puede apreciar en los párrafos precedentes, la economía circular ofrece una oportunidad transformadora para la infraestructura vial rural, ya que permite alinear los

CBVT con los desafíos actuales: escasez de recursos, cambio climático y aumento de residuos. Su aplicación no requiere necesariamente tecnologías complejas o costosas, sino una nueva lógica de planificación, diseño y operación basada en la eficiencia, la regeneración y la responsabilidad ambiental.

La experiencia internacional muestra que, con voluntad institucional, conocimiento técnico, actualización y complementación de los marcos normativos y colaboración entre sectores, los CBVT pueden convertirse en referentes de infraestructura circular, especialmente en territorios donde cada recurso cuenta.

Propuesta de integración de metodologías internacionales para la gestión sustentable de proyectos

A medida que el desarrollo de infraestructura enfrenta crecientes exigencias ambientales, sociales y climáticas, surge la necesidad de sistemas que permitan evaluar, monitorear y mejorar el desempeño sostenible de los proyectos durante todo su ciclo de vida. En este contexto, diversas metodologías internacionales de gestión sustentable han sido desarrolladas para aplicar criterios de sostenibilidad a proyectos de infraestructura, permitiendo la toma de decisiones más responsables, transparentes y basadas en evidencia.

Para los CBVT, estas metodologías pueden ser una herramienta clave para mejorar la planificación, el diseño, la ejecución y el mantenimiento, especialmente en contextos rurales en los que los impactos del desarrollo vial son altamente sensibles y los recursos deben optimizarse al máximo.

A continuación se presentan las herramientas más reconocidas internacionalmente, con énfasis en su aplicabilidad a caminos rurales o CBVT.

Greenroads Rating System

Desarrollada en EE.UU., Greenroads es una metodología específica para proyectos viales que evalúa la sostenibilidad mediante un sistema de créditos. Se estructura en categorías como diseño ambiental, eficiencia de materiales, gestión de la construcción, comunidad y accesibilidad. Sus principales características son:

- Es aplicable a la construcción de vías nuevas, las rehabilitaciones y las mejoras.
- Incluye créditos por uso de materiales reciclados, planes de mantenimiento sostenible, mitigación ambiental y participación comunitaria.
- Ofrece niveles de certificación: *Certified*, *Silver*, *Gold* y *Evergreen*.

La metodología Greenroads se aplica mediante la planilla de cuantificación de parámetros que se observa en la Tabla 1.

TABLA 1. EVALUACIÓN GREENROAD

1. AGUA Y AMBIENTE (EW)	
Título	Puntaje
Alineamiento preferido	1-3
Conectividad ecológica	1-3
Conservación de hábitat	1-3
Mejoras en el uso de las tierras	1-3
Calidad de la vegetación	1-3
Manejo del suelo	1-3
Conservación del agua	1-3
Control de erosiones	1-3
Manejo de metales (chatarras)	1-3
Tratamiento de contaminantes	1-3

2. ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN (CA)	
Título	Puntaje
Excelencia ambiental	1-3
Salud y seguridad en las zonas de trabajo	1-2
Procesos de calidad	1-3
Eficiencia en el uso del combustible	1
Emisiones en las zonas de trabajo	1
Uso del agua en las zonas de trabajo	1-3
Construcción acelerada	1-2
Integridad en la procura	1
Comunicación	1
Fuerza laboral competente	1-2
Desarrollo económico Local	1

3. DISEÑO Y MATERIALES (MD)

Título	Puntaje
Reúso y preservación	1-5
Reciclaje y reconversión	1-5
Productos con declaración ambiental	2
Productos con declaración de salud	2
Materiales locales	1-5
Diseño para el largo plazo	1-5

4. CONTROL Y FACILIDADES (UC)

Título	Puntaje
Facilidades mejoradas	1-2
Accesos de emergencia	1
Infraestructura para vehículos eléctricos	1-3
Eficiencia energética	1-3
Energías alternativas	1-3
Iluminación y control	1-3
Reducción de las emisiones de tráfico	1-3
Reducción del tiempo de viaje	1-2

5. ACCESO Y RESPONSABILIDAD (AL)

Título	Puntaje
Auditorías de seguridad	1-2
Mejoras en la seguridad	1-2
Conectividad multimodal	1-2
Equidad y accesibilidad	1-2
Transporte activo	1-2
Análisis de los impactos a la salud	2
Reducción del ruido	1-3
Recreación y cultura	1-2
Arqueología e historia	1-2
Escenario y estética	1-2

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Análisis del impacto ambiental | 7. Control de calidad |
| 2. Huella energética y de carbono | 8. Prevención de la polución |
| 3. Impacto en el desarrollo | 9. Manejo de residuos |
| 4. Análisis del impacto social | 10. Manejo del ruido |
| 5. Compromiso con la comunidad | 11. Análisis de conflictos |
| 6. Análisis del ciclo de vida | 12. Sistema de gestión de activos |

N°	CRITERIOS	SUBCRITERIOS	PUNTAJE MÁXIMO
1	Agua y medio ambiente	10	30
2	Actividades de construcción	11	20
3	Materiales y diseño	6	24
4	Control y facilidades	8	20
5	Accesos y responsabilidad	10	21
Total:		45	130

N°	PUNTAJES	NIVEL
1	> 61%	Siempre Verde
2	61%– 46%	Oro
3	38%–46%	Plata
4	30%–38%	Bronce
5	< 30%	En desarrollo

CAPÍTULO

4



Guía de diseño geométrico y seguridad vial

Guía técnica de soluciones e innovaciones tecnológicas
para la mejora de caminos de bajo volumen de tráfico en Perú

CAPÍTULO 4

Guía de diseño geométrico y seguridad vial

En este capítulo se proporciona una guía referencial para el diseño geométrico y la seguridad vial en los CBVT, a fin de garantizar su funcionalidad, eficiencia y adaptabilidad a las condiciones del entorno. Se abordan los principios del diseño geométrico, con foco en la relación entre las características topográficas y el desempeño de la infraestructura vial. Se detallan los factores de diseño esenciales, incluyendo velocidad de operación, radios de curvatura, pendientes y criterios de visibilidad, asegurando la transitabilidad y seguridad de los usuarios. Se establecen criterios dimensionales con recomendaciones para la sección transversal, el ancho de calzada y los taludes de corte y relleno. Finalmente, se explora el uso de herramientas GIS y modelos BIM para la optimización del diseño geométrico, permitiendo una mejor planificación, modelado y gestión de los CBVT con base en datos geoespaciales y simulaciones avanzadas.

GEOMETRÍA DE UN CAMINO CBVT



Foto: Provías Descentralizado

Criterios del diseño geométrico aplicables a CBVT

El diseño geométrico de los CBVT constituye una etapa crítica en la planificación y ejecución de infraestructura vial rural, ya que determina no sólo la funcionalidad y eficiencia de la vía, sino también su seguridad, durabilidad y adaptabilidad al entorno. A diferencia de las carreteras convencionales, los CBVT requieren enfoques específicos que consideren sus bajos niveles de tránsito, la limitada capacidad institucional y financiera en áreas rurales, y la necesidad de responder a contextos topográficos y climáticos desafiantes. Los principales criterios de diseño geométrico a tener en cuenta son:

- **Diseño adaptado al contexto.** El diseño geométrico en CBVT debe sustentarse en un enfoque adaptativo, conocido como diseño contextual, se aleja de la aplicación rígida de parámetros estándar para priorizar soluciones viables, seguras y sostenibles en función del entorno real. Las condiciones del terreno, la geografía local, la geología, la hidrología y los patrones de uso del suelo son insumos esenciales. Según distintos manuales y documentos de referencia, los CBVT deben diseñarse incorporando la variabilidad de los factores locales, priorizando la transitabilidad y la seguridad en lugar de la velocidad o la capacidad de carga típica de vías de mayor jerarquía.
- **Diseño centrado en la funcionalidad y la seguridad.** El principal objetivo del diseño geométrico en CBVT es garantizar la funcionalidad mínima y continua de la vía durante la mayor parte del año, especialmente en periodos de condiciones climáticas adversas. Este objetivo debe lograrse sin comprometer la seguridad vial de los usuarios. La seguridad, en este contexto, implica minimizar los riesgos de accidentes mediante decisiones geométricas coherentes con las condiciones reales del camino, como curvas suaves, pendientes moderadas y buena visibilidad. El diseño debe considerar la coexistencia de distintos tipos de usuarios: vehículos motorizados, peatones, ciclistas, ganado y maquinaria agrícola. En muchos casos, los CBVT son utilizados por poblaciones vulnerables, por lo que el diseño debe ser inclusivo y tomar en cuenta aspectos como sobreanchos, zonas de espera y señalización adecuada.
- **Diseño simplificado pero con solidez técnica.** Dadas las características operativas de los CBVT, particularmente su bajo flujo vehicular y las restricciones recurrentes de financiamiento, el diseño geométrico debe basarse en metodologías simplificadas, pero que aseguren plena consistencia técnica y funcionalidad vial. Estos criterios deben responder a estándares adaptativos, orientados a optimizar el uso de recursos sin comprometer la seguridad, la durabilidad o la eficiencia del sistema vial rural. Entre los criterios fundamentales destacan: selección de velocidad de operación razonable, uso de radios mínimos seguros en curvas horizontales, manejo de pendientes longitudinales y visibilidad adecuada en tramos rectos y curvas. Respecto a este último criterio es importante destacar que los diseños deben garantizar distancias de parada seguras, incluso bajo condiciones climáticas adversas: lluvias, granizos, niebla y eventualmente nieve.

- **Integración de la seguridad vial desde el diseño.** La seguridad vial debe abordarse desde la concepción misma del proyecto. Ello implica identificar posibles puntos críticos de riesgo, como curvas cerradas sin visibilidad, cruces mal definidos, zonas escolares o segmentos propensos a deslizamientos. El uso de técnicas de evaluación de seguridad vial durante el diseño (como auditorías de seguridad vial o inspecciones de diseño) permite anticipar y mitigar situaciones de peligro. Además, se recomienda incorporar dispositivos pasivos de seguridad como señalización vertical básica (curvas, pendientes, poblados), elementos visuales reflectantes en curvas y tramos con visibilidad reducida, cunetas seguras y transitables, y dispositivos de reducción de velocidad en zonas pobladas. Estos elementos deben integrarse de forma coherente con las características geométricas del camino para asegurar una experiencia de conducción predecible y segura.
- **Vinculación con el mantenimiento vial del camino.** El diseño geométrico no debe considerar únicamente la transitabilidad inicial, sino también la facilidad de la ejecución de la conservación posterior como criterio transversal. Por ejemplo, un sobreebanco que facilite el paso de maquinaria de mantenimiento, o taludes accesibles para desbroce y limpieza, son claves en zonas con microempresas viales o conservación comunitaria. Esto facilita estas labores y contribuye de manera directa a la sostenibilidad operativa del camino.

El diseño geométrico de los CBVT no puede replicar esquemas tradicionales de carreteras de mayor jerarquía. Requiere un enfoque técnico adaptativo, en el que la funcionalidad, la eficiencia constructiva y la seguridad vial se equilibren. Un diseño bien contextualizado no sólo reduce costos y facilita la construcción, sino que mejora sustancialmente la experiencia y seguridad de los usuarios, generando impactos positivos sostenibles en las comunidades rurales.

Factores de diseño

El diseño geométrico de CBVT debe regirse por un conjunto de factores técnicos que, en su conjunto, aseguren la transitabilidad, funcionalidad y seguridad de la vía, adaptándose a condiciones topográficas, climáticas, sociales y presupuestarias específicas. Los factores de diseño requieren una flexibilización normativa controlada, basada en criterios técnicos adaptativos y en la evaluación del desempeño esperado. La adecuada consideración de estos factores reduce los riesgos de accidentes, optimiza los costos de construcción y mantenimiento, y mejora la vida útil del camino.

Los principales factores que guían el diseño de CBVT incluyen la velocidad de operación, los radios mínimos de curvatura, las pendientes máximas admisibles, las condiciones de visibilidad y los aspectos asociados al entorno de operación y al tipo de usuario.

- **Velocidad de diseño y operación.** La velocidad de diseño representa uno de los principales parámetros que condiciona el trazado geométrico. En CBVT, esta debe definirse con base en la topografía del terreno, el entorno del camino (poblado, agrícola, forestal, etc.), el tipo y volumen de tránsito previstos y las condiciones climáticas predominantes en la zona (precipitaciones, niebla, heladas). Según recomendaciones internacionales y nacionales, se recomienda adoptar velocidades entre 20 y 40 km/h para caminos rurales de bajo volumen, que se pueden disminuir en zonas de alta sinuosidad o con riesgos específicos.
- **Radios de curvatura.** Los radios mínimos de curvatura horizontal deben permitir el paso seguro de vehículos típicos del entorno rural, como camionetas, tractores y camiones medianos. Los valores orientativos de radios mínimos para CBVT se describen en la Tabla 2:

TABLA 2. VALORES ORIENTATIVOS PARA RADIOS MÍNIMOS PARA CBVT

VELOCIDAD (KM/H)	RADIO MÍNIMO SIN PERALTE (M)	RADIOS MÍNIMOS CON PERALTE (M)
30	25-45	20-30
40	45-60	30-50

Se recomienda incluir sobreanchos en curvas cerradas, especialmente en caminos con calzadas de un solo carril, para facilitar maniobras seguras. En caminos con un solo carril, las curvas representan uno de los puntos críticos más comunes para incidentes viales, por lo que deben diseñarse con especial atención a la interacción entre vehículos y las posibilidades de detención o cruce.

- **Pendiente longitudinal.** Este parámetro dependerá principalmente de la topografía, la tipología de suelo existente y la solución planteada. Las pendientes influyen directamente en la capacidad del vehículo para ascender (tracción), frenar (seguridad), mantener una velocidad constante y evitar deslizamientos, especialmente en caminos no pavimentados o con tratamiento superficial delgado. En un CBVT, una pendiente inadecuada puede ser la causa principal de deterioro prematuro (formación de baches, erosión por escorrentía, exposición de la subrasante). Por ejemplo, en zonas montañosas, donde el relieve impone desafíos adicionales, puede aceptarse una pendiente superior al 10% únicamente si se complementa con elementos de seguridad y se justifica mediante análisis de estabilidad y riesgo. En cambio, en zonas de lluvias intensas como la Selva, se debe evitar la combinación de pendientes elevadas con materiales granulares poco cohesivos, ya que se produce arrastre superficial. El diseño debe contemplar la relación entre la pendiente longitudinal y las pendientes

transversales de drenaje para garantizar un escurrimiento efectivo sin erosionar los bordes del camino. En pendientes prolongadas se recomienda interrumpir la pendiente mediante curvas verticales de transición, así como incluir elementos de descanso de vehículos (áreas de detención o refugios si es posible).

PENDIENTE LONGITUDINAL DE UN CAMINO CBVT



Fuente: Provías Descentralizado

- **Visibilidad y distancia de parada.** La visibilidad disponible en el trazado del camino es clave para garantizar decisiones oportunas por parte del conductor. Se deben considerar tres tipos de visibilidad: de parada, es decir la distancia mínima para detenerse ante un obstáculo; de adelantamiento de ser posible, aunque es poco frecuente en CBVT de un solo carril; y en curvas, la cual debe garantizar la percepción del trazado por parte del conductor mediante el despeje del triángulo de visibilidad. En tramos con visibilidad reducida, se recomienda complementar el diseño con señalización preventiva, delineadores, control de vegetación y otros. La pérdida de visibilidad es una de las causas más frecuentes de accidentes en caminos rurales, por lo cual el diseño geométrico debe prever su aseguramiento y mantenerlo a lo largo del tiempo mediante gestión de la vegetación, señalización e inspecciones de seguridad.
- **Tipo de usuario y entorno operativo.** El diseño debe considerar no sólo a los vehículos motorizados, sino también a otros usuarios como peatones, ciclistas, ganado y transporte agrícola. La coexistencia de estos usuarios exige un diseño no centrado exclusivamente en vehículos motorizados. Por ello, deben incorporarse medidas de protección como zonas de sobreancho para permitir paso peatonal seguro, reducción de velocidad en zonas habitadas, señalización específica en cruces ganaderos o escolares, y priorización del diseño en función de la experiencia del usuario promedio.

También se debe tener en cuenta que el diseño geométrico debe ser tolerante a errores y minimizar la complejidad de maniobras, ya que muchos conductores rurales carecen de formación técnica en conducción o manejan vehículos en mal estado mecánico.

USUARIOS DE UN CAMINO CBVT



Foto del autor

Los factores de diseño geométrico en CBVT deben definirse a partir de un enfoque técnico, adaptativo y centrado en la seguridad. Lejos de aplicar esquemas rígidos, estos caminos requieren decisiones que integren las condiciones reales del entorno, el tipo de tránsito esperado y las limitaciones presupuestarias. Una correcta selección y articulación de estos factores garantiza no sólo la funcionalidad y vida útil de la infraestructura, sino también una experiencia de tránsito segura, inclusiva y resiliente.

Dimensionalidad

La dimensionalidad en el diseño de CBVT se refiere a las dimensiones físicas que definen la forma y la sección transversal del camino, como el ancho de calzada y las bermas. Estos parámetros deben ser definidos de manera coherente con el volumen y el tipo de tránsito esperados, el entorno topográfico y climático, y las capacidades de construcción y mantenimiento existentes en la zona. A diferencia de las carreteras de alta jerarquía, para las que existen estándares rígidos definidos por el volumen de tránsito, en los CBVT la dimensionalidad debe ser flexible, contextualizada y eficiente, buscando equilibrio entre costos de inversión, funcionalidad mínima requerida y seguridad vial.

- **Sección transversal.** La sección transversal de un CBVT es el componente más visible y funcional de su diseño. La definición de sus componentes debe garantizar la transitabilidad continua, la seguridad de los usuarios y la sostenibilidad del camino durante su vida útil. De acuerdo a la normativa nacional y las referencias internacionales, la sección transversal para un CBVT debería considerar lo siguiente:

SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN CBVT



Foto: Provías Descentralizado

- **Ancho de calzada.** Para los CBVT, un criterio relevante a considerar es el tipo de vehículo que utilizará el camino y la frecuencia de cruce entre vehículos. En ese sentido se puede definir que un ancho adecuado para una vía de un solo carril con sobre anchos sería de 4 a 5 m y deberá incluir zonas de paso cada cierta distancia para el cruce seguro.
- **Bermas y sobreanchos.** Las bermas laterales cumplen funciones clave en la operación de CBVT: permiten maniobras, detenciones de emergencia, escurrimiento superficial y seguridad adicional frente a salidas del carril. En caminos rurales, también sirven como espacio de circulación peatonal o de ganado. Especialmente ante estas últimas situaciones se deben considerar la incorporación de zonas de tránsito seguro lateral o señalización adecuada para minimizar los riesgos. El ancho mínimo de bermas debería ser de 0.5 a 1 m.
- **Otros elementos.** Entre estos elementos se encuentran los taludes, los cuales dependerán del tipo de suelo, la altura de corte/relleno y las condiciones climáticas. Los taludes inestables son siempre una fuente de deslizamientos, colapsos e interferencia en la circulación del tránsito. La especialidad de taludes debe ser analizada detenidamente por especialistas que tengan un conocimiento adecuado de las soluciones que podrían ser aplicables para este tipo de caminos.

- **Dimensiones adaptadas al mantenimiento.** Un error común en proyectos de CBVT es sobredimensionar el camino sin considerar la capacidad local para su mantenimiento. La dimensión debe ser suficiente para el tránsito pero apta para recibir mantenimiento con la disponibilidad real de maquinaria, materiales locales y capacidades de gestión local. Por ejemplo, un camino de un carril de 4 m de ancho con sobreanchos cada 300 m y cunetas bien diseñadas puede tener mayor vida útil que un camino sobredimensionado sin drenaje adecuado ni mantenimiento.

La dimensionalidad de los CBVT no puede definirse desde un criterio único de diseño, sino con una mirada integrada del territorio, el tipo de usuario y las capacidades operativas de la comunidad o autoridad local. Al diseñar secciones transversales realistas, eficientes y adaptadas, se garantiza que la infraestructura funcione con seguridad, perdure en el tiempo y pueda ser conservada sin comprometer recursos futuros.

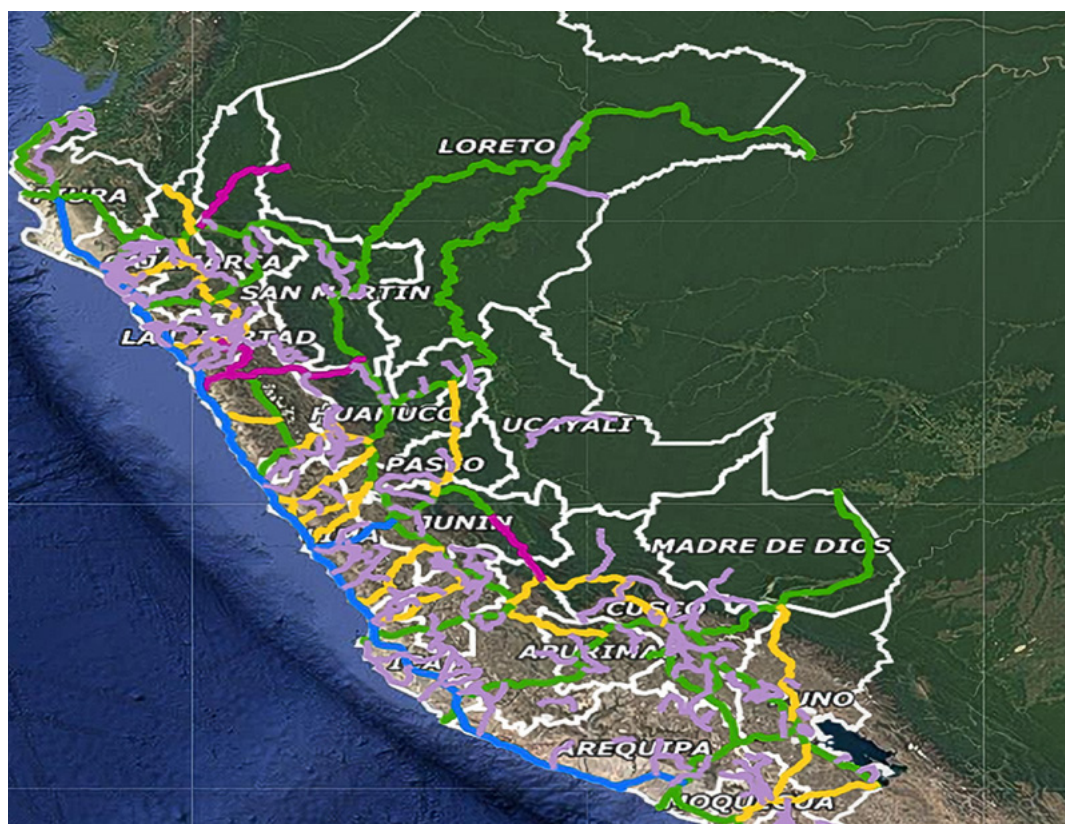
Usos de herramientas GIS, modelos BIM para optimización del diseño y otras tecnologías emergentes

En las últimas décadas, el uso de herramientas digitales en el diseño, planificación y gestión de la infraestructura vial ha experimentado una evolución significativa. En el contexto de los CBVT, las tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (GIS) y los Modelos de Información para la Construcción (BIM) ofrecen oportunidades concretas para optimizar el diseño geométrico, mejorar la toma de decisiones y reducir costos a lo largo del ciclo de vida de la vía, incluso en territorios con recursos limitados. Aunque estas herramientas han sido históricamente aplicadas en otros ámbitos, su adopción progresiva en proyectos rurales permite integrar datos geoespaciales, modelar escenarios con mayor precisión, anticipar riesgos y promover intervenciones más eficientes, resilientes y sostenibles.

Aplicación de GIS en el diseño y planificación de CBVT

Los GIS permiten capturar, analizar, visualizar y gestionar información geoespacial, lo que los convierte en una herramienta clave para la planificación territorial, el diseño vial y la priorización de intervenciones en caminos rurales. Para los CBVT, sus aplicaciones específicas son:

FIGURA 5. MAPA DE CORREDORES VIALES Y CORREDORES VIALES ALIMENTADORES DE PERÚ



Fuente: visor.geoperu.gob.pe

- **Identificación de trazados óptimos.** Mediante el análisis de capas topográficas, hidrológicas y de uso de suelo se pueden definir corredores viales que minimicen movimientos de tierra, eviten zonas de alto riesgo geotécnico y respeten áreas de valor ecológico, cultural, arqueológico y otros.
- **Evaluación de riesgos geográficos y climáticos.** Se pueden superponer mapas de pendientes, zonas de deslizamiento, inundabilidad o erosión, lo que permite anticipar problemas que afecten la estabilidad del camino o durante su etapa de manutención.
- **Priorización de intervenciones.** El uso de índices compuestos en GIS (como los de accesibilidad, vulnerabilidad poblacional o costo-beneficio) permite orientar inversiones hacia tramos con mayor impacto socioeconómico.
- **Gestión del mantenimiento vial:** los GIS facilitan la creación de sistemas locales de inventario vial, con fichas georreferenciadas de estado físico, tráfico, obras de drenaje y siniestralidad, útiles para entidades subnacionales.

- **Auditorías de seguridad vial georreferenciadas:** se pueden mapear puntos críticos (curvas peligrosas, visibilidad reducida, intersecciones no controladas) para priorizar acciones correctivas.

Las herramientas más comunes para aplicar los GIS en caminos de CBVT son QGIS (libre y de código abierto), ArGIS, Google Earth Pro. Para la información base se suele considerar la compra de datos satelitales (SRTM, Copernicus, LandSat, otros), que permite desarrollar los modelos digitales de elevaciones.

Aplicación de modelos BIM en caminos rurales

El Building Information Modeling (BIM) es una metodología que permite crear representaciones digitales precisas de obras de infraestructura a lo largo de todo su ciclo de vida: desde el diseño hasta la construcción y el mantenimiento.

USO DEL BIM EN DESARROLLO DE CBVT PERÚ



Foto: Vías PUCP

Aunque originalmente desarrollado para edificaciones, su uso en infraestructura vial –incluso en CBVT– se está expandiendo por su capacidad de integrar múltiples disciplinas en un entorno colaborativo. Entre los beneficios de incorporar BIM en los CBVT están los siguientes:

- **Modelado geométrico tridimensional:** permite representar la vía y su entorno con mayor realismo, visualizando cortes, rellenos, drenajes, estructuras de soporte y señalización en un solo modelo integrado.

- **Simulación de comportamientos estructurales e hidráulicos:** se pueden anticipar fallas mediante simulaciones de escurrimiento superficial, sobrecarga estructural o deslizamientos, lo que reduce el retrabajo y mejora la durabilidad.
- **Coordinación entre disciplinas:** permite integrar los aportes de ingeniería civil, ambiental, geotécnica y comunitaria en una única plataforma, reduciendo errores de diseño.
- **Gestión de costos y cronogramas:** el modelo puede vincularse a herramientas de control de programación de obras (4D) y de costos (5D), lo que es especialmente útil en proyectos financiados por cooperación internacional o gobiernos locales.
- **Uso en el mantenimiento:** un modelo BIM bien estructurado puede servir como base de datos para gestión vial (puentes, obras de drenaje, señalización), facilitando las decisiones operativas y de conservación.

Entre las herramientas más habituales para la implementación del BIM en los CBVT están Autodesk Civil 3D o InfraWorks; para diseño geométrico vial con integración BIM, Revit; para estructuras complementarias, OpenRoads Designer (Bentley Systems), que es específico para carreteras, y Navisworks. Finalmente, se usa Synchro para la simulación de los procesos de construcción.

La incorporación de herramientas GIS y modelos BIM en el diseño y gestión de caminos rurales representa una oportunidad estratégica para mejorar la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de los CBVT. Estas tecnologías permiten dejar atrás enfoques fragmentados o puramente empíricos, y avanzar hacia una planificación moderna, basada en datos, interoperable y orientada a resultados. Si bien existen barreras institucionales y tecnológicas, su implementación progresiva —comenzando con proyectos piloto y alianzas técnicas— puede transformar la manera en que se conciben, construyen y mantienen los caminos que conectan Perú.

Otras tecnologías aplicables a CBVT

Además de los sistemas expuestos anteriormente, el desarrollo y conservación de los CBVT puede beneficiarse del uso de otras tecnologías digitales, sensoriales, móviles y de datos abiertos. Estas soluciones no sólo facilitan la recopilación y procesamiento de información, sino que también mejoran la eficiencia y la transparencia de las intervenciones viales en entornos rurales. Entre estas nuevas alternativas están:

- **Teledetección.** La utilización de imágenes satelitales, drones y sensores aéreos permite obtener información actualizada, de alta resolución y bajo costo sobre la topografía, cobertura vegetal, drenaje, deterioro superficial y accesibilidad de las vías rurales.
- **Uso de herramientas móviles.** Las aplicaciones móviles permiten recoger datos de campo georreferenciados directamente desde teléfonos inteligentes o tabletas,

facilitando el proceso de recolección y creación de inventarios viales, incluso con participación de comunidades locales. Estas herramientas permiten implementar esquemas de gestión comunitaria de caminos con soporte digital.

- **Inteligencia Artificial (IA).** En el diseño geométrico de CBVT, la IA puede cumplir funciones clave, tanto en la etapa de análisis preliminar como en la fase de optimización geométrica y asistencia al diseño adaptativo. A través del uso de algoritmos de Machine Learning, se pueden analizar múltiples rutas posibles sobre mapas topográficos y geoespaciales. El sistema puede “aprender” de rutas anteriores exitosas (ya construidas) y sugerir nuevas alineaciones más eficientes, reduciendo el esfuerzo manual de evaluación multicriterio. Respecto a la optimización de los parámetros geométricos, la IA también puede utilizarse para ajustar automáticamente aquellas características clave —como radios de curvatura, pendientes, sobreanchos y distancias de visibilidad— para maximizar la seguridad y minimizar el movimiento de tierras o las interferencias con el entorno. Por último, una IA entrenada con datos geoespaciales y características del terreno puede predecir qué tramos del diseño geométrico son propensos a problemas (fallas de taludes y condiciones inseguras de visibilidad, entre otros). La IA puede ayudar a validar automáticamente si un diseño cumple con criterios mínimos normativos (como del MTC o de AASHTO) y alertar al diseñador si hay consideraciones que deban ser tomadas.

Recomendaciones para el diseño seguro en contextos rurales

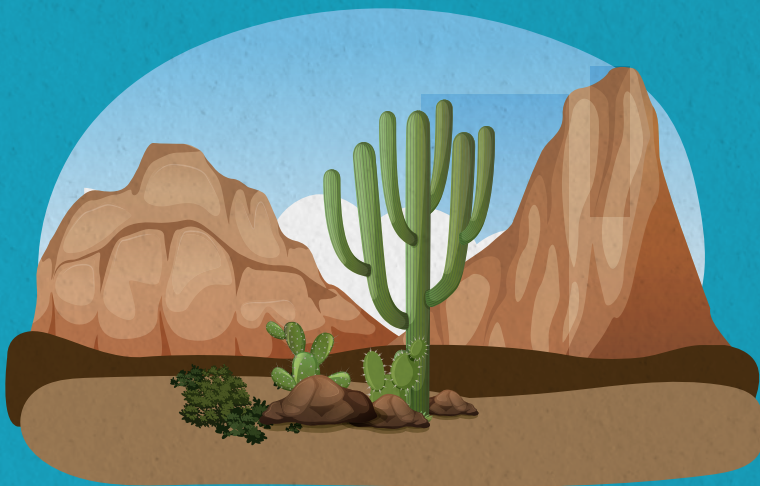
La seguridad vial en CBVT es una prioridad crítica para el diseño geométrico, especialmente en países como Perú, donde la infraestructura vial constituye no sólo un medio de transporte, sino el único vínculo de acceso a servicios esenciales para millones de personas. Diseñar caminos seguros en contextos rurales implica ir más allá de los estándares tradicionales: se trata de comprender el entorno, anticipar los comportamientos de los usuarios, identificar factores de riesgo geográfico y social, y aplicar soluciones sencillas pero efectivas que reduzcan la siniestralidad y fortalezcan la resiliencia vial.

El diseño seguro de los caminos rurales debe considerar los siguientes fundamentos: tolerancia a los errores (caminos en los que la equivocación de un conductor no tenga que ser fatal), coexistencia segura entre los distintos tipos de usuarios, prevención integrada, inclusión de usuarios vulnerables y participación comunitaria. Respecto a esto último, se recomienda que, como parte del proceso de diseño, se puedan realizar talleres locales, recorridos participativos y validación de trazados preliminares con actores comunitarios antes de definir la geometría definitiva del camino.

El diseño geométrico seguro en CBVT no es sólo un tema técnico, sino una necesidad esencial para salvar vidas, reducir costos de mantenimiento y garantizar la sostenibilidad social de las inversiones en conectividad rural. Un camino seguro es aquel que dialoga con el territorio, respeta al usuario rural y anticipa los riesgos de forma inteligente.

CAPÍTULO

5



Guía de drenaje en caminos de bajo volumen de tránsito

CAPÍTULO 5

Guía de drenaje en caminos de bajo volumen de tránsito

En este capítulo se entra en detalle sobre los criterios para una guía técnica referencial de drenaje en CBVT. Se subraya el impacto en la durabilidad y funcionalidad, explicando cómo un diseño deficiente puede acelerar el deterioro de la superficie de rodadura y afectar la estabilidad estructural de la vía, y se presentan ejemplos de lecciones aprendidas de programas y proyectos viales aplicados en Perú. Se describen los sistemas de drenaje, incluyendo drenajes longitudinales (cunetas, zanjas filtrantes), drenajes transversales (alcantarillas, vados) y drenaje subterráneo (filtros geotextiles y sistemas de infiltración). Además, se abordan las innovaciones tecnológicas en drenaje, como el uso de sensores de monitoreo en tiempo real, el modelado hidrológico para la optimización del diseño y las soluciones de bioingeniería para mejorar la infiltración y el control del agua. Por último, se exponen estrategias de control de erosión y estabilidad de taludes, considerando técnicas como revegetación, estructuras de contención y protección con geosintéticos, que aseguren la resiliencia de los CBVT frente a eventos climáticos adversos y reduzcan los impactos negativos sobre el entorno.

Importancia del drenaje en la durabilidad de los CBVT

El sistema de drenaje de un camino constituye un conjunto integrado de elementos cuyo objetivo es captar, conducir, infiltrar o evacuar el agua superficial y subterránea de manera controlada, evitando que interfiera con el comportamiento de la vía. En los CBVT, donde las calzadas suelen tener pavimentados básicos o no estar pavimentados, el drenaje representa el elemento más crítico para garantizar la vida útil del camino y minimizar el mantenimiento rutinario.

En contextos rurales, con condiciones climáticas altamente variables y un mantenimiento limitado o irregular, un sistema de drenaje mal diseñado o inexistente puede conducir al rápido deterioro de la superficie de rodadura, la inestabilidad estructural del paquete vial, y en casos extremos, al colapso parcial o total de la vía.

COLAPSO DE PLATAFORMA POR PROBLEMAS DE DRENAJE



Foto: www.andina.pe

Estudios nacionales e internacionales coinciden en que un alto porcentaje de los daños en caminos no pavimentados o con revestimientos delgados tienen origen en fallas asociadas a drenajes inapropiados. Cuando el agua no es adecuadamente controlada, se generan procesos de infiltración en la subrasante, pérdida de soporte estructural, erosión de taludes y plataformas, socavación de cunetas y carreteras, y en zonas de montaña, deslizamientos y desprendimientos de ladera.

La situación se agrava en zonas rurales de montaña o selva, donde las precipitaciones intensas, los suelos inestables y la falta de infraestructura de drenaje conducen rápidamente a deterioros prematuros. En el caso peruano, varios proyectos viales desarrollados bajo programas con entidades gubernamentales han documentado casos de caminos que, pese a haber sido rehabilitados, han fallado antes de tiempo por la falta de soluciones de drenaje adecuadas.

Desde una perspectiva técnica, el drenaje en CBVT no puede abordarse como un elemento accesorio, sino como un componente fundamental y esencial del diseño. Esto implica entender este sistema de distintas tipologías de elementos longitudinales, transversales y subterráneos, cuyo diseño debe estar basado en principios hidráulicos básicos, adaptados a caudales de diseño apropiados y ajustados a la geografía local. En este sentido, los principios clave que deben guiar un drenaje eficaz en caminos rurales incluyen:

- Evitar que el agua superficial circule sobre la calzada.

- Interceptar el agua en puntos altos y derivarla adecuadamente.
- Minimizar la velocidad de escurrimiento para reducir erosión.
- Asegurar la rápida evacuación del agua subterránea acumulada.
- Facilitar el mantenimiento frecuente, simple y de bajo costo.

El diseño hidráulico de drenaje en CBVT debe ser robusto pero simplificado, enfocado en garantizar la funcionalidad bajo condiciones extremas de precipitación, pero sin requerir estructuras de alto costo o mantenimiento especializado. Esto cobra especial importancia en zonas como la Sierra y la Selva peruanas, donde las intensas lluvias en cortos periodos de tiempo generan escorrentías que superan rápidamente la capacidad de estructuras convencionales mal dimensionadas.

Una consideración fundamental es la participación comunitaria en el diseño y mantenimiento del drenaje, lo cual no sólo fortalece la sostenibilidad de la inversión, sino que permite la identificación temprana de zonas críticas y la aplicación de soluciones basadas en conocimiento local.

En suma, el drenaje no es un complemento técnico sino el pilar fundamental para asegurar que los CBVT sean verdaderamente funcionales y sostenibles en el tiempo. Sin un drenaje adecuado, cualquier mejora estructural pierde eficacia rápidamente, mientras que cuando está bien diseñado, incluso los caminos de menor estándar pueden cumplir con su rol social y económico de manera confiable y prolongada.

Sistemas de drenaje

Un sistema de drenaje está compuesto por tres subsistemas principales:

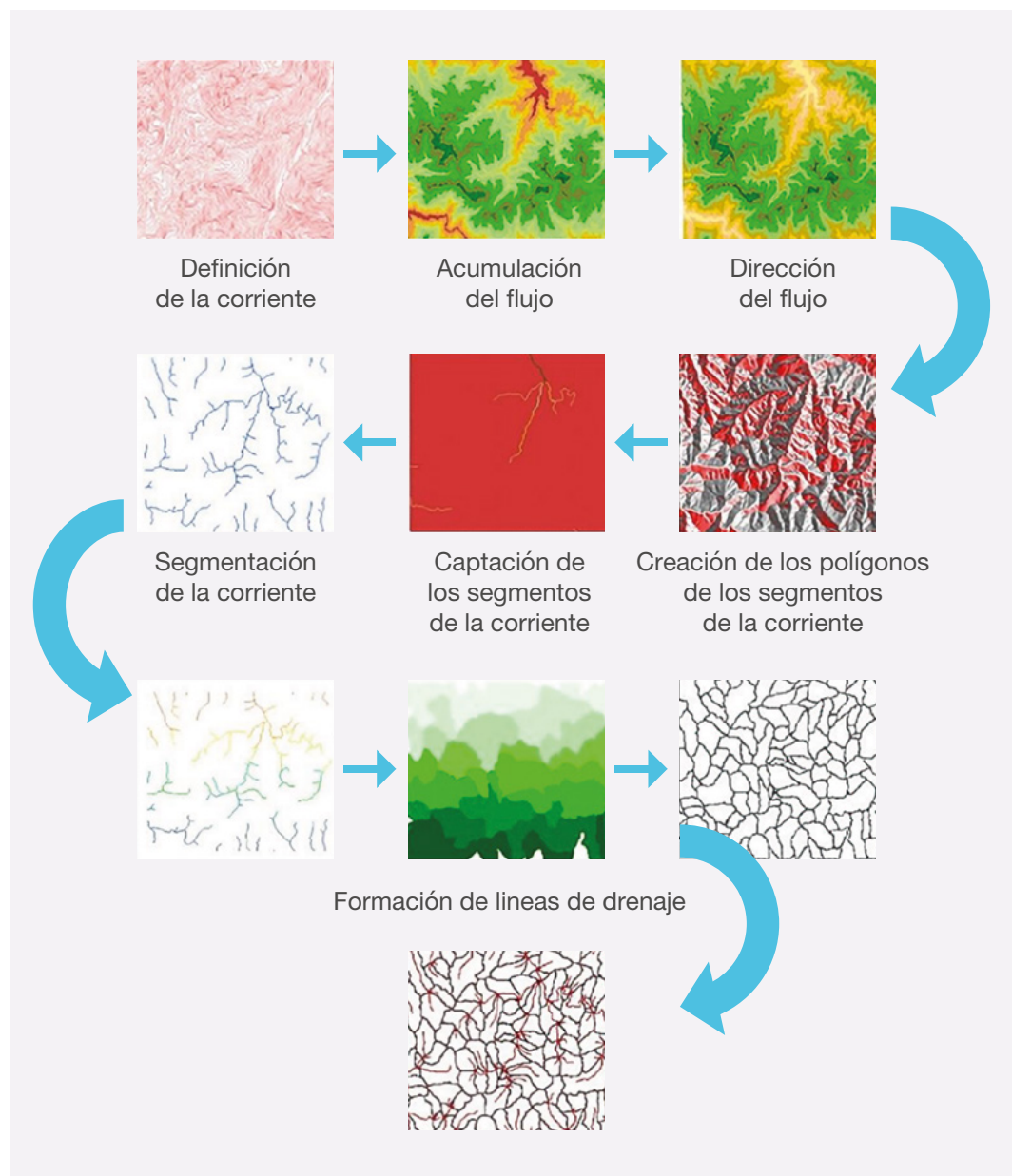
1. **Drenaje superficial longitudinal:** cunetas, zanjas de coronación, bordillos
2. **Drenaje superficial transversal:** alcantarillas, vados, badenes
3. **Drenaje subterráneo:** drenes longitudinales, subdrenes, entre otros.

Criterios generales de diseño del sistema de drenaje

El diseño de un sistema de drenaje para CBVT debe seguir una lógica integral que articule los principios de la hidráulica aplicada, el análisis hidrológico local y la interacción suelo-estructura, todo ello adaptado a las condiciones topográficas, geológicas y climáticas del entorno. A diferencia de la infraestructura vial convencional, en los CBVT no se busca maximizar capacidad de conducción sino minimizar los efectos negativos del agua sobre la infraestructura a través de soluciones sencillas, robustas y fáciles de mantener.

Los criterios generales que deben regir el diseño del sistema de drenaje son:

- **Adecuada caracterización hidrológica.** Todo sistema debe partir de un estudio de hidrología que permita estimar los caudales de diseño (Q) para diferentes períodos de retorno (T). En caminos rurales, los períodos típicos varían dependiendo del tipo de estructura y la criticidad del tramo. Entre las variables clave a analizar se incluyen la intensidad y distribución de precipitaciones, las características locales y su capacidad de infiltración, las pendientes de la cuenca y rugosidad, el área de aporte efectiva y las condiciones actuales del entorno. Existen distintas metodologías para definir el caudal de diseño, que pueden complementarse con análisis de eventos extremos en zonas de alta pluviosidad.

FIGURA 5. PROCESO DE CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e hidráulica del Perú - SENAMHI.

- **Concepción integral del sistema.** El sistema debe entenderse como un circuito cerrado que interconecta captación, conducción y disposición final del agua. Es decir, no basta con construir cunetas o alcantarillas aisladas, sino que deben trabajar en conjunto, considerando la interacción entre cunetas y alcantarillas, la compatibilidad hidráulica entre secciones (transición fluida entre elementos), el tratamiento de descargas (evitar erosión en puntos de vertido), y la incorporación de elementos de control de velocidad, escorrentía y sedimentación. Además, el diseño debe integrar soluciones para condiciones de mantenimiento limitado: dimensiones mínimas que

permitan descolmatar manualmente, pendientes mínimas que eviten sedimentación y materiales resistentes al desgaste por agua.

- **Adaptación al entorno y uso de materiales apropiados.** La elección del tipo, la materialidad y la dimensión de cada elemento del sistema debe estar basada en criterios técnicos como la pendiente del terreno, el tipo de suelo, la frecuencia de lluvias, la disponibilidad de materiales y las capacidades locales de mantenimiento. El uso de materiales locales debe priorizarse frente a soluciones importadas de difícil reposición.

ADAPTACIÓN AL ENTORNO DE OBRAS DE DRENAJE



Foto: <https://ponce.sdsu.edu>

- **Diseño con enfoque de resiliencia y sostenibilidad.** El diseño resiliente del drenaje rural no es más costoso, sino más inteligente: reduce el deterioro, mejora la seguridad vial y disminuye las pérdidas por aislamiento o cierre de vías. Todo diseño debe considerar que el cambio climático aumentará la frecuencia y severidad de eventos extremos, por lo que se debe prever la instalación de sistemas redundantes, es decir, alcantarillas secundarias o rebosaderos, soluciones basadas en la naturaleza (SBN) como canales vegetados, zanjas de infiltración o biocunetas.

Drenaje superficial longitudinal

Este sistema se encarga de captar y conducir el agua que escurre por la superficie del camino, principalmente la proveniente de lluvias y escorrentía natural de laderas. Su adecuada implementación es fundamental para evitar que el agua fluya directamente sobre la calzada, lo que genera erosión del material de rodadura, formación de baches y arrastre de finos que afectan la capacidad estructural del paquete vial. Sus principales elementos son:

- **Cunetas.** Fundamentales para el drenaje longitudinal, pueden ser revestidas o no, según las características del flujo que las demande. Deben dimensionarse para conducir caudales de diseño basados en la lluvia máxima probable y el área de captación. Su pendiente longitudinal mínima recomendada es de 0.5%, aunque en suelos poco permeables puede ser mayor.

CONSTRUCCIÓN DE CUNETAS PARA DRENAJE SUPERFICIAL



Foto: www.peruconstruye.net

- **Zanjas de coronación:** Localizadas en la parte superior de taludes de corte, evitan que el agua fluya hacia la plataforma. Son esenciales en zonas montañosas.

Este tipo de estructuras de drenaje deben diseñarse para captar tanto el agua que cae de la plataforma como la que proviene de las áreas laterales. Se recomienda incorporar dispositivos de disipación de energías, especialmente en lugares donde se presentan pendientes pronunciadas, para evitar la erosión. Por último, se debe prever el fácil acceso para la conservación y el mantenimiento.

Drenaje superficial transversal

Los dispositivos transversales permiten cruzar el flujo de agua a través del eje del camino sin que interfiera con la estructura vial. Son especialmente relevantes en quebradas y zonas de cruce de escorrentías naturales, o en presencia de cunetas longitudinales en ambas márgenes. Los principales elementos que se pueden encontrar en los CBVT son:

- **Alcantarillas tubulares** (de concreto o PVC corrugado). Son las más comunes. Su diámetro debe calcularse para el caudal de diseño de período de retorno adecuado según la normativa, dependiendo de la criticidad del tramo. En CBVT, los diámetros típicos oscilan entre 400 mm y 900 mm.
- **Alcantarillas tipo cajón**. Se utilizan en zonas donde se requiere mayor capacidad de paso o condiciones de suelo poco favorables.
- **Badenes**. Son soluciones integradas como parte del perfil transversal del camino y se utilizan donde el paso del agua no es frecuente. Su diseño debe prever protección contra socavación y material de revestimiento resistente al agua corriente (piedra, concreto).

CONSTRUCCIÓN DE BADÉN PARA DRENAJE TRANSVERSAL



Foto del autor

Drenaje subterráneo

Aunque menos frecuente en los CBVT por razones de costo y complejidad, el drenaje subterráneo es fundamental en zonas con nivel freático alto, suelos arcillosos poco drenantes o condiciones de infiltración lateral permanente. Estos elementos deben ser contruidos con materiales que permita la filtración, pero evitando la migración de finos hacia las estructuras, con pendientes mínimas que produzcan un flujo adecuado. Un aspecto muy importante es que permitan la inspección, descolmatación y mantenimiento periódicos. Las soluciones más comunes son:

- **Sub-drenes longitudinales.** Se ubican paralelos a la calzada, captando agua infiltrada y conduciéndola hacia puntos de descarga. Se componen de zanjas rellenas con material filtrante (grava) y tubería perforada.
- **Drenes transversales con geotextiles.** Se usan para interceptar flujos subterráneos laterales, especialmente en cortes de ladera.
- **Capas drenantes en la estructura del pavimento.** Se trata de revestimientos de base granular permeable o capas con material seleccionado, para evacuar agua infiltrada desde la superficie hacia los extremos de la vía.

Errores frecuentes y buenas prácticas

La experiencia acumulada en caminos rurales del Perú y de América Latina evidencia una serie de errores recurrentes que comprometen la funcionalidad del sistema de drenaje y aceleran el deterioro de la vía. Reconocerlos y evitarlos es clave para garantizar la sostenibilidad de los CBVT:

- **Sub-dimensionamiento de alcantarillas.** Produce inundación de la vía, socavación, colapso de la estructura
- **Ausencia de cabeceras y disipadores.** Produce erosión en entradas/salidas, pérdida de soporte lateral
- **Falta de pendiente en cunetas (<0,3%).** Se traduce en estancamiento, proliferación de maleza, colmatación
- **Uso de materiales no drenantes en drenes.** Asociado a saturación del terraplén, pérdida de capacidad portante
- **Descarga sin control a taludes.** Asociada a erosión regresiva, deslizamientos
- **Alineamiento inadecuado de alcantarillas.** Produce contraflujo, sedimentación interna, baja eficiencia

- **Falta de mantenimiento post-construcción.** Asociada con obstrucciones, pérdida total de funcionalidad

Innovaciones tecnológicas en drenaje

La incorporación de innovaciones tecnológicas en el drenaje vial de los CBVT representa una oportunidad estratégica para mejorar la durabilidad, resiliencia y eficiencia de la infraestructura rural, especialmente frente a desafíos como el cambio climático, el mantenimiento limitado y las condiciones topográficas extremas. Si bien los CBVT tradicionalmente han sido atendidos con soluciones convencionales, hoy existe un creciente repertorio de tecnologías accesibles y sostenibles que permiten optimizar el diseño, monitoreo y operación de sistemas de drenaje en zonas rurales.

Las innovaciones pueden agruparse en tres categorías principales:

- **Monitoreo y sensorización del comportamiento hidráulico.** El uso de sensores de bajo costo y herramientas de monitoreo remoto permite supervisar en tiempo real el comportamiento de estructuras de drenaje, caudales y saturación del terreno. Esto facilita la detección temprana de fallas y la gestión de riesgos ante lluvias intensas. Estas tecnologías pueden integrarse en plataformas y georreferenciarse mediante sistemas GIS.
- **Modelación hidrológica e hidráulica para optimización del diseño.** Los avances en software de simulación han hecho posible que incluso proyectos de baja escala puedan incorporar modelos computacionales para el diseño hidráulico, con el fin de dimensionar adecuadamente las estructuras de drenaje según condiciones reales del entorno.
- **Soluciones sostenibles y tecnologías basadas en la naturaleza.** El diseño de drenaje en CBVT puede beneficiarse significativamente del uso de soluciones basadas en la naturaleza (SBN) y materiales no convencionales que permiten infiltrar, retener o disolver el escurrimiento superficial sin necesidad de estructuras costosas o de difícil mantenimiento. Un ejemplo que está cobrando cada vez más relevancia es la utilización de biocunetas, que son zanjas revestidas con vegetación estabilizadora que conducen el agua y a la vez promueven infiltración. Pueden incorporar filtros vegetales o geotextiles biodegradables.

Las innovaciones tecnológicas aplicadas al drenaje de CBVT permiten superar muchas de las limitaciones tradicionales que afectan a la infraestructura rural: errores de dimensionamiento, deterioro rápido, mantenimiento costoso o ineficaz, y falta de capacidad técnica. Incorporar sensores, modelación digital y soluciones sostenibles no sólo mejora la calidad técnica del diseño, sino que aumenta la vida útil, reduce los costos operativos y fortalece la resiliencia frente al cambio climático.

El desafío no está en la disponibilidad de estas tecnologías, sino en su apropiación progresiva y contextualizada por parte de los gobiernos locales, las comunidades rurales y los profesionales encargados de diseñar y conservar caminos. Invertir en innovación es, en este contexto, invertir en eficiencia, equidad y sostenibilidad.

Estrategias de control de erosión y estabilidad de taludes

El control de la erosión y la estabilización de taludes son componentes clave en la gestión del drenaje de los CBVT, especialmente en regiones rurales con fuerte pendiente, suelos inestables y lluvias intensas, como ocurre en muchas zonas de la Sierra y la Selva de Perú. La falta de medidas adecuadas en estos elementos ha sido identificada como una de las principales causas de interrupciones viales, colapsos de plataforma y pérdida de inversión en infraestructura rural.

A continuación, se presentan las principales estrategias que pueden utilizarse de forma aislada o combinada, según las condiciones geotécnicas y presupuestales del proyecto:

- **Bioingeniería y revegetación.** El uso de técnicas basadas en vegetación (como siembra directa, hidrosiembra o barreras vivas) permite estabilizar superficies expuestas, reducir la escorrentía superficial y controlar la erosión. Las especies nativas con raíces profundas (vetiver, ichu, pastos locales) son especialmente eficaces. La incorporación de geotextiles biodegradables (coco, yute) puede acelerar el proceso de estabilización.
- **Estructura de protección superficial.** En zonas de alta pendiente o con caudales concentrados, se recomiendan revestimientos de cunetas y bases de taludes con piedra colocada, gaviones o concreto simple. Estas soluciones reducen la velocidad del agua y previenen la socavación. También se pueden emplear escalones o dissipadores para controlar la energía del escurrimiento.
- **Técnicas de drenaje interno.** La infiltración no controlada puede saturar los suelos y generar deslizamientos. El uso de subdrenes horizontales, zanjas filtrantes o geodrenes prefabricados permite evacuar el agua del interior del talud, manteniendo su estabilidad estructural.
- **Contención y refuerzo.** En taludes críticos se pueden usar soluciones como muros de gaviones, muros verdes tipo Krainer, geomallas o geoceldas, combinando resistencia física y permeabilidad. Estas estructuras estabilizan los taludes mientras permiten la revegetación y el drenaje superficial.

APLICACIÓN DE SISTEMA DE CONTENCIÓN DEL TALUD



Foto del autor

El control de la erosión y la estabilización de taludes son componentes inseparables del sistema de drenaje de los CBVT. Una vía puede colapsar no por una falla del pavimento o la geometría, sino por una pequeña socavación, una alcantarilla sin dissipador o un talud sin revegetar. La combinación de soluciones estructurales y naturales permite construir caminos más resilientes, sostenibles y armónicos con su entorno.

Diseñar con enfoque preventivo y adaptativo, integrando criterios geotécnicos, hidráulicos y sociales, es fundamental para que los caminos rurales del Perú no sólo conecten comunidades, sino que lo hagan de forma segura, duradera y respetuosa con el territorio.

CAPÍTULO

6



Guía de soluciones para la plataforma de rodadura: estabilizaciones y recubrimientos

CAPÍTULO 6

Guía de soluciones para la plataforma de rodadura: estabilizaciones y recubrimientos

En este capítulo se proporciona una guía técnica para la selección e implementación de soluciones en la plataforma de rodadura de los CBVT, con enfoque en estabilización y recubrimientos para mejorar la durabilidad, resistencia y seguridad de estas infraestructuras. En primer lugar se discute la selección de alternativas de solución, donde se definen criterios técnicos, económicos y ambientales para elegir la mejor opción en función del tipo de suelo, clima y volumen de tránsito. Posteriormente, se abordan las técnicas de estabilización, incluyendo métodos mecánicos, químicos y el empleo de geosintéticos para mejorar la capacidad estructural del camino. Asimismo, se presentan las técnicas de protección de la superficie, tales como tratamientos superficiales, *slurry seal* y micropavimentos, con el objetivo de mitigar la erosión, mejorar la resistencia al tráfico y reducir el levantamiento de polvo. Finalmente, se analizan las innovaciones en recubrimientos bituminosos, con el uso de asfaltos modificados, emulsiones avanzadas y mezclas con materiales reciclados, permitiendo extender la vida útil de los CBVT y optimizar los costos de mantenimiento. Se hace énfasis en las lecciones aprendidas y las experiencias verificadas sobre soluciones que no son las más adecuadas para el clima y la carga en distintos corredores viales, como ocurrió en el programa PROREGIÓN.

APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL



Foto del autor

Selección de alternativas de solución

La correcta selección de la solución para la plataforma de rodadura en los CBVT es determinante para garantizar la funcionalidad, durabilidad, seguridad, eficiencia económica e impacto social de estas vías. Una decisión incorrecta en esta etapa puede generar consecuencias graves: fallas prematuras, aumento de los costos de mantenimiento, pérdida de transitabilidad estacional y, en muchos casos, inutilización total del camino durante periodos críticos, afectando el acceso a servicios básicos y el desarrollo de actividades productivas rurales. Es por ello que este paso debe abordarse con un enfoque técnico riguroso y adaptado a las particularidades del entorno, que considere los siguientes aspectos:

- **La plataforma de rodadura como eje funcional de los CBVT.** La plataforma de rodadura es el componente más expuesto de un camino rural. Se encuentra en contacto directo con el tráfico y las condiciones ambientales, lo cual la convierte en el punto más crítico de deterioro. Su estabilidad, resistencia estructural y capacidad de drenaje son los factores que más inciden en la conservación de la vía y en la seguridad de los usuarios. En los CBVT, que en el caso peruano atienden generalmente a menos de 200 vehículos por día, la plataforma debe diseñarse con soluciones simples pero eficaces, capaces de resistir cambios climáticos extremos, adaptarse a suelo de baja calidad, y operar en contextos logísticos complejos. Por esta razón, una correcta selección no debe depender exclusivamente del costo inicial, sino de un análisis integral que contemple el ciclo de vida del camino, la disponibilidad de materiales locales, el régimen hídrico y el tipo de carga que transita, entre otros aspectos.
- **La selección de soluciones es parte de la planificación integral.** La selección de soluciones no debe entenderse como una acción aislada del diseño, sino como parte de un proceso integral de planificación vial, que comienza con un diagnóstico detallado y culmina con la definición de alternativas de intervención. Este proceso debe considerar herramientas de análisis geotécnico, evaluación ambiental, criterios de tránsito, condiciones socioeconómicas del entorno y capacidades de operación y mantenimiento disponibles. Aplicar matrices multicriterio, realizar evaluaciones comparativas de soluciones y tomar decisiones con base en la experiencia regional son pasos indispensables para asegurar el éxito de la intervención. Además, es esencial fomentar una cultura de evaluación post-obra y sistematización de resultados, lo que permitirá construir un banco de soluciones efectivas por zona geográfica.
- **Enfoque territorial y técnico como pilares de decisión.** Dado que los CBVT en el Perú se desarrollan en regiones muy diversas –desde zonas áridas costeras, pasando por pendientes pronunciadas en la Sierra, hasta condiciones tropicales extremas en la Selva–, es imprescindible que la selección de soluciones esté basada en un enfoque territorial diferenciado, como también lo recomiendan el Manual de Caminos Rurales de Provías Descentralizado (2024) y las directrices internacionales. El uso inadecuado de una solución que funcionó en una región, que se replica sin ajustes en otra con condiciones distintas, es una de las prácticas más comunes y riesgosas.

Factores técnicos de selección de alternativas

La selección de la solución más adecuada para la plataforma de rodadura de un CBVT debe basarse en un análisis de factores técnicos que aseguren el desempeño estructural y funcional de la vía en el tiempo. Esto permite adaptar las soluciones constructivas a las condiciones específicas del entorno, evitando fallas prematuras, sobredimensionamientos o inversiones ineficientes.

A continuación, se describen los principales factores técnicos que deben considerarse para fundamentar adecuadamente la elección de la solución vial:

- **Propiedades geotécnicas del suelo de fundación.** Un diagnóstico geotécnico adecuado del suelo de fundación permite decidir si se requiere algún tipo de estabilización, ya sea mecánica (adición de material granular), química (cal, cemento, polímeros, enzimas) o incluso basada en el uso de geosintéticos como elementos de refuerzo y separación. Para esto, variables típicas como la granulometría, los índices de plasticidad, el contenido de humedad natural, la capacidad de soporte (CBR) y otras más específicas como el nivel freático y el nivel de congelamiento, son críticas para la toma de decisiones, las cuales deberán estar acompañadas de análisis de datos por medio de herramientas como la sectorización de tramos homogéneos.
- **Condiciones climáticas.** El régimen climático tiene un impacto decisivo en la elección del tipo de recubrimiento, la necesidad de drenaje y la resistencia de la superficie de rodadura. En zonas de alta pluviosidad, las soluciones deberán permitir una rápida evaluación del agua superficial y en zonas con ciclos de hielo y deshielo, muy comunes en la Sierra, las soluciones deben ser probadas para resistir el agrietamiento térmico.
- **Tránsito y cargas esperadas.** Un análisis adecuado permitirá determinar la demanda, a través del número acumulado de ejes equivalentes. Esto permite definir la estructura mínima requerida y la necesidad de refuerzo o tratamiento de la base. Aunque en los CBVT la demanda de tránsito es reducida, el tipo de carga transportada (por ejemplo, camiones de eje simple o doble en actividades agrícolas o mineras) puede generar esfuerzos estructurales superiores a los esperados.
- **Disponibilidad de materiales locales.** La factibilidad técnica debe acompañarse de una evaluación de logística y disponibilidad de materiales. En zonas remotas, el uso de soluciones que requieran importación de materiales o maquinaria especializada puede volverse inviable económicamente. Una posibilidad a considerar es utilizar residuos de construcción, industriales o materiales reciclados (escorias, RAP, cenizas) provenientes de otras industrias, lo que permitirá impulsar la economía circular.
- **Condiciones topográficas e hidráulicas.** Las soluciones deben considerar emplazamiento, es decir, deben ser factibles de implementar a fin de asegurar un adecuado funcionamiento. Desde el punto de vista topográfico es importante evaluar las pendientes, y desde el hidráulico prever la posibilidad de utilizar alternativas tipo subdrenes, capas drenantes u otras que permitan la escurriencia del agua.

- **Capacidad de mantenimiento y operación.** Este es uno de los aspectos más relevantes al momento de definir la solución a implementar y está directamente relacionado con la capacidad local para operar y mantener la solución escogida. Una técnica muy efectiva técnicamente puede volverse inviable si no existen recursos o conocimientos para su conservación. La solución más óptima es aquella que pueda ser mantenida con recursos razonables y conocimiento local.

La combinación de estos criterios técnicos debe abordarse de manera sistemática, preferentemente mediante herramientas de análisis multicriterio y en consulta con actores locales. El éxito de la solución no sólo depende de su diseño, sino de su adecuación al entorno y a las capacidades locales de ejecución y mantenimiento.

Criterios económicos y de ciclo de vida

La sostenibilidad técnica de un camino rural no puede analizarse de forma aislada respecto a su viabilidad económica. En los CBVT, donde los recursos disponibles son usualmente limitados y los entornos rurales presentan altos costos logísticos y bajos retornos financieros directos, la selección de soluciones para la plataforma debe fundamentarse no sólo en su capacidad estructural, sino también en su eficiencia económica a lo largo del ciclo de vida. La aplicación de criterios económicos permite identificar alternativas que sean tanto de construcción viable como financieramente sostenibles, a fin de evitar inversiones iniciales bajas que resulten en costos de mantenimiento excesivos o reconstrucciones prematuras.

A continuación, se presentan algunos de los principales criterios a considerar:

- **Costo inicial versus costo del ciclo de vida (LCCA).** Una práctica común, pero técnicamente inadecuada, es seleccionar soluciones únicamente con base en el menor costo inicial. Esto suele conducir a la adopción de capas de rodadura mínimas, materiales de bajo estándar o técnicas sin evaluación del entorno climático, geológico y operativo. Aunque estas opciones pueden parecer económicamente atractivas al inicio, en muchos casos generan un incremento de los costos de mantenimiento y rehabilitación a corto plazo. Por ello, el criterio económico más adecuado es el análisis de costo del ciclo de vida (*Life Cycle Cost Analysis*, LCCA), que considera costo inicial de construcción, costos de mantenimiento rutinario y periódico esperados, frecuencia de intervenciones de rehabilitación, la vida útil estimada de la solución y los costos sociales y económicos por pérdida de transitabilidad (como la interrupción de acceso a servicios o mercados).
- **Costo de mantenimiento y capacidad institucional.** El costo total de un CBVT no puede obviar los gastos de mantenimiento. Por tanto, una solución técnicamente eficiente debe ir acompañada de una evaluación realista de cuánto costará mantenerla en condiciones aceptables. Elegir una técnica o solución de ingeniería que suponga un mantenimiento costoso, complejo o que dependa de insumos no

disponibles localmente puede traducirse en falla operativa, incluso si la solución es técnicamente sólida.

- **Impacto en costos sociales y económicos.** Además del análisis financiero clásico, deben considerarse los costos sociales asociados a la interrupción de la vía. Estas externalidades deben integrarse, en la medida de lo posible, en la evaluación económica. Herramientas como HDM-4 (Highway Development and Management Model, desarrollada por el Banco Mundial) e incluso modelos simplificados como *Roads Economic Decision* (RED), ampliamente utilizadas a nivel internacional y también en Perú, permiten modelar estos costos bajo diferentes escenarios de mantenimiento y uso.
- **Valor residual y reciclabilidad.** Un criterio adicional en el análisis económico es la recuperabilidad o reciclabilidad de la solución. Técnicas que permiten recuperar parte de los materiales (como reciclado en frío de capas bituminosas u otras) pueden ser preferibles desde el punto de vista económico a largo plazo. Además, considerar el valor residual de las capas estructurales en un eventual futuro recubrimiento puede modificar significativamente el análisis costo-beneficio.
- **Priorización territorial basada en retorno social.** Finalmente, cuando los recursos son escasos, la selección de soluciones debe considerar también el retorno social de la inversión. Un camino con bajo IMD pero que conecta un centro de salud o un eje productivo clave puede justificar soluciones de mayor estándar que otro con mayor tránsito, pero menor relevancia funcional. Este enfoque, utilizado en programas como el de PROREGIÓN, permite orientar las inversiones no sólo por criterios financieros, sino también por impacto territorial y equidad.

Criterios ambientales y sociales

En el contexto actual de cambio climático, la incorporación de criterios ambientales y sociales en la selección de soluciones para los CBVT es una necesidad técnica y ética. Esta dimensión del análisis permite asegurar que las intervenciones en infraestructura vial rural sean eficientes desde el punto de vista técnico y económico, pero también respetuosas con el entorno natural y beneficiosas para las comunidades locales.

- **Reducción del impacto ambiental directo.** Los proyectos viales, incluso a pequeña escala, generan impactos significativos en su entorno. La selección de soluciones debe considerar la minimización de la remoción de vegetación nativa y alteración del paisaje; el control de la erosión durante y después de la ejecución (con revegetación, control de escorrentía y diseño adecuado de taludes); la reducción del consumo de recursos naturales, como agua y materiales pétreos; y que se pueda evitar la alteración de cuerpos de agua, zonas húmedas o áreas protegidas.

- **Huella de carbono y eficiencia energética.** Toda solución vial tiene una huella de carbono asociada, que proviene del transporte de materiales, el uso de maquinaria, la producción de ligantes (como el asfalto) y la emisión indirecta por deterioros acelerados. En ese sentido, lo ideal es favorecer el uso de materiales locales y tecnologías que requieran bajo consumo energético, priorizar el empleo de estabilizantes naturales o subproductos reciclados y evitar el uso de asfaltos convencionales en zonas remotas si implica transporte intensivo.
- **Participación comunitaria y apropiación social.** La dimensión social en los CBVT es crucial. Los caminos rurales no son meramente infraestructuras de transporte, sino elementos de cohesión territorial, acceso a servicios y conectividad productiva. Por ello, la selección de soluciones debe considerar la consulta con las comunidades sobre necesidades de transitabilidad, accesos, puntos críticos y prioridades; la evaluación de la capacidad de operación y mantenimiento local de la solución propuesta; y la inclusión de la comunidad en tareas de mantenimiento rutinario y control ambiental.

Proceso metodológico para la selección de soluciones

El proceso de selección de soluciones técnicas para la plataforma de rodadura debe seguir una metodología clara, estructurada y sistemática. Esta metodología debe permitir evaluar de manera objetiva las condiciones físicas, sociales, climáticas y económicas del entorno, comparando diferentes alternativas en función de su desempeño técnico, viabilidad operativa y sostenibilidad a largo plazo.

En zonas rurales diversas como las de Perú, es esencial contar con una metodología de selección adecuada, ya que condiciones similares en variables de diseño requieren soluciones adaptadas a las particularidades locales.

Las etapas del proceso se describen a continuación:

- **Etapla 1: diagnóstico técnico y contextual.** Consiste en la recopilación y análisis de información clave del tramo o red a intervenir. En este paso se debería incluir la caracterización del tipo de suelo y condiciones geotécnicas (CBR, IP, granulometría), análisis del régimen climático, evaluación del tránsito actual y proyectado, revisión de la capacidad institucional y comunitaria para el mantenimiento, inventario de materiales locales disponibles y consideraciones sociales y ambientales relevantes.
- **Etapla 2: identificación de alternativas viables.** Con base en el diagnóstico, se construye una lista de al menos dos soluciones técnicas preliminares. Cada alternativa debe contar con suficiente información técnica que describa la materialidad requerida, vida útil esperada, requerimientos de mantenimiento, costos referenciales y ventajas y limitaciones operativas.

- **Etapa 3: evaluación comparativa multicriterio.** Para seleccionar la mejor alternativa se recomienda aplicar un análisis jerárquico multicriterio (AMC) que permita ponderar diferentes aspectos según la importancia que tengan en el proyecto. Los criterios más frecuentes son desempeño técnico, costo del ciclo de vida, adaptación climática, impacto ambiental, mantenibilidad y aceptación social.
- **Etapa 4: selección final y validación.** Una vez seleccionada la alternativa más adecuada, es fundamental realizar una revisión técnica detallada y obtener la correspondiente validación. Este paso garantiza la viabilidad técnica, económica, ambiental y social del proyecto y permite generar una base para las posteriores etapas del proyecto.

La aplicación de una metodología estructurada y técnica para la selección de soluciones en CBVT permite maximizar la eficiencia de los recursos públicos, reducir fallas prematuras y promover intervenciones sostenibles y resilientes. Un proceso que integre criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales no sólo mejora la infraestructura, sino también la confianza de la población en las instituciones que la construyen.

Errores frecuentes y recomendaciones

A pesar de los esfuerzos por profesionalizar la gestión de caminos rurales en América Latina, la experiencia evidencia que muchos proyectos de CBVT fallan no por falta de recursos, sino por una inadecuada selección de soluciones técnicas. Estos errores, muchas veces recurrentes, comprometen la vida útil del camino, generan sobrecostos y afectan la calidad de vida de las comunidades beneficiarias. Identificar y comprender estas fallas permite fortalecer los procesos de planificación, diseño y ejecución, y construir una cultura de gestión basada en evidencia.

Entre los errores más usuales están:

- **Uso de soluciones estandarizadas sin análisis contextual.** Se replican alternativas que son consideradas un modelo, sin tener en cuenta las particularidades del lugar donde estarán emplazadas.
- **Subestimación de las solicitudes.** En muchos diseños sólo se considera la solicitud del IMD sin distinguir tipos particulares de cargas. Esta práctica suele conducir al uso de capas estructurales inadecuadas, lo que genera deformaciones plásticas, formación de huellas y otros defectos.
- **Diseños sin criterios de drenaje adecuados.** Esta es una de las fallas críticas y recurrentes al momento de considerar el diseño estructural. Sin un adecuado sistema de drenaje, incluso la mejor solución estructural colapsará rápidamente.
- **Ausencia de evaluación post-obra.** En muchos programas, una vez terminada la obra, no se realiza monitoreo técnico sobre el comportamiento real de la solución.

Esto impide ajustar los diseños futuros con base en desempeño, sistematizar fallas y aciertos y retroalimentar a los equipos de formulación y diseño.

Evitar errores frecuentes en la selección de soluciones para CBVT requiere de un enfoque integral, basado en datos y evaluación del desempeño. El aprendizaje institucional y la gestión del conocimiento son componentes clave para lograr soluciones viables, sostenibles y adaptadas al territorio.

Técnicas de estabilización

La estabilización de suelos y capas estructurales constituye una etapa crítica en el diseño y construcción de los CBVT, especialmente en contextos rurales con suelos de bajas prestaciones estructurales y condiciones climáticas adversas. Sus funciones esenciales son mejorar la capacidad de soporte, reducir la deformabilidad, controlar la humedad y prolongar la vida útil de la plataforma de rodadura, permitiendo que la vía cumpla con su función de conectividad incluso en temporadas de lluvia o de alta demanda.

Es importante, en este contexto, diferenciar entre mejoramiento y estabilización de suelos, ya que, aunque ambos conceptos buscan mejorar el desempeño, su alcance y mecanismos son distintos:

- El mejoramiento de suelos se refiere a la modificación de una o más propiedades específicas del suelo natural, mediante procesos mecánicos o la incorporación de materiales acondicionantes, sin alterar de manera permanente su estructura mineralógica.
- En cambio, la estabilización de suelos implica una modificación permanente del comportamiento del suelo, a través de procesos fisicoquímicos.

Esta distinción es clave al momento de seleccionar la técnica más adecuada en función del objetivo del proyecto, la disponibilidad de materiales y las condiciones geotécnicas del terreno.

La estabilización actúa en tres niveles de mejora:

- **En la subrasante:** mejora la resistencia y uniformidad del suelo natural, reduciendo su sensibilidad a la humedad y evitando deformaciones plásticas.
- **En la subbase o base granular:** incrementa la rigidez y la capacidad portante, disminuyendo el espesor necesario de recubrimientos superficiales.
- **En la interfaz de capas:** permite una mejor distribución de esfuerzos y evita la pérdida de contacto entre capas.

Este fortalecimiento estructural se traduce en mayor durabilidad de la vía y menores costos de mantenimiento, especialmente en zonas con tránsito agrícola, transporte escolar o acceso a servicios básicos.

Estabilización mecánica

La estabilización mecánica es una de las técnicas más utilizadas y accesibles en caminos rurales. Consiste en modificar la estructura física del suelo o capa granular mediante la adición, remoción, mezcla o compactación de materiales, sin emplear productos químicos, con el objetivo de mejorar su capacidad de soporte, reducir la deformabilidad y aumentar la resistencia al agua y al tránsito. Debido a su bajo costo relativo, facilidad de implementación y adaptabilidad a contextos logísticos rurales, es una técnica ampliamente recomendada, siempre y cuando se practique junto con un adecuado diagnóstico de suelos y un control constructivo.

Los objetivos fundamentales de esta técnica son:

- Homogeneizar la granulometría del suelo o del afirmado, mejorando su compactabilidad.
- Reducir la plasticidad mediante la adición de material no cohesivo (arena o grava).
- Incrementar la fricción interna y la estabilidad estructural.

Las ventajas y limitaciones de la estabilización mecánica son:

- Bajo costo y alta disponibilidad de materiales.
- No requiere insumos industriales ni transporte especializado.
- Es compatible con posteriores tratamientos superficiales o recubrimientos.
- Facilita la participación comunitaria o microempresas locales.

Por otro lado, la estabilización mecánica tiene estas limitaciones:

- No mejora químicamente la interacción entre partículas.
- Su desempeño es altamente dependiente del control de compactación y mezcla.
- No es eficaz en suelos extremadamente finos, colapsables o con alto contenido de materia orgánica.
- Es necesario incorporar fuentes de materiales alternativas en la mayoría de las ocasiones.

Los métodos más comunes de estabilización mecánica son:

- **Adición de material granular.** Consiste en incorporar material seleccionado (arena, grava, piedra triturada o mezcla) sobre suelos nativos plásticos o finos, con el fin de mejorar la distribución granulométrica y la capacidad de soporte. Usualmente se aplica en subrasantes de bajas prestaciones mecánicas con alto Índice de Plasticidad (IP) y baja capacidad de soporte ($\text{CBR} < 5\%$). El espesor y proporción del material añadido se determinan con ensayos previos de laboratorio y análisis granulométrico combinado.
- **Mezclado, recomposición y compactación intensiva.** En sitios donde el suelo cumple condiciones mínimas y puede mejorarse significativamente mediante una reconformación y compactación adecuada, que reduzca la porosidad, incremente la fricción entre partículas y mejore la resistencia a la deformación.

La estabilización mecánica, correctamente diseñada y ejecutada, es una solución efectiva, económica y replicable para mejorar el comportamiento estructural de CBVT en entornos rurales. Si bien presenta limitaciones en suelos extremos o ambientes saturados, puede ser una estrategia clave para intervenciones escalables, mantenimiento periódico y preparación de bases para tratamientos posteriores más duraderos.

Estabilización química

La estabilización química es una técnica que consiste en modificar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo mediante la adición de agentes químicos estabilizantes, con el objetivo de aumentar su resistencia, reducir su plasticidad, disminuir su permeabilidad y mejorar su durabilidad frente a condiciones climáticas extremas y tránsito vehicular. Este tipo de estabilización es particularmente útil cuando se trabaja con suelos cohesivos de baja capacidad portante, comunes en zonas rurales del Perú, como las arcillas de alta plasticidad en la Sierra y los suelos lateríticos en la Selva, que presentan una fuerte sensibilidad a la humedad.

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE SUELO ESTABILIZADO



Foto: www.agroperu.pe

Las ventajas y limitaciones de la estabilización química son:

- Permite el uso de suelos locales marginales, reduciendo costos logísticos.
- Mejora la estabilidad estructural y resistencia al agua.
- Facilita la aplicación de recubrimientos duraderos.
- Reduce la frecuencia de mantenimiento y prolonga la vida útil del camino.

Sus limitaciones son las siguientes:

- Requiere experiencia técnica y control de calidad.
- Algunos productos tienen costos elevados o poca disponibilidad local.
- Las condiciones de clima extremo pueden afectar el curado.
- Es indispensable contar con drenaje funcional, ya que ninguna técnica es efectiva si el camino permanece saturado.

Los métodos más comunes de estabilización química son:

1. **Estabilización con cal.** La cal, en forma de óxido de calcio (cal viva) o hidróxido de calcio (cal hidratada), reacciona con los minerales arcillosos del suelo (especialmente los silicatos de aluminio y hierro) en presencia de agua. Esta reacción produce dos efectos: por un lado la reducción de la plasticidad del suelo, y por otro la

disminución de la humedad óptima de compactación en el corto plazo y la mejora de la trabajabilidad a largo plazo, formando compuestos cementantes (principalmente silicatos y aluminatos cálcicos hidratados) que endurecen el suelo. Se utiliza principalmente en suelos con alta plasticidad ($IP > 10\%$), con alto contenido de finos (pasante tamiz N° 200 $> 30\%$), con alta posibilidad de hinchamientos y con baja capacidad de soporte. Es decir, puede aplicarse en suelos arcillosos. Las ventajas son que disminuye el índice plástico y mejora la compacidad y la durabilidad, reduce la sensibilidad al agua, aumenta la resistencia en el tiempo (por la formación de productos cementantes) y permite el uso de suelos locales marginales, reduciendo costos. Pero esta técnica tiene una eficiencia limitada en suelos sin contenido significativo de arcilla activa. Requiere tiempo de curado adecuado (mínimo 3 días, óptimo 7 días o más). Además, puede tener bajo desempeño en climas fríos si no se compacta adecuadamente.

ESTABILIZACIÓN DEL SUELO CON CAL



Foto: www.mycal.pe

2. **Estabilización con cemento Portland.** El cemento Portland reacciona químicamente con el agua para formar una matriz cementante que aglutina las partículas del suelo, aumentando su cohesión y resistencia. A diferencia de la cal, el cemento puede estabilizar tanto suelos granulares como algunos suelos arcillosos con baja plasticidad, siempre que haya mezcla y humedad adecuadas. Usualmente se utilizan en materiales para subbases y bases granulares. Entre las ventajas de la utilización del cemento como estabilizador están la ganancia rápida de resistencia, la alta rigidez y durabilidad a largo plazo, el que puede reducir significativamente el espesor estructural requerido y el que este material es adecuado para estabilización profunda y reciclado *in situ*. Al mismo tiempo, el cemento tiene susceptibilidad a la fisuración si no se controla la humedad y el curado. Su costo es superior al de la cal en algunas regiones. No es recomendable para suelos con alta plasticidad o materia orgánica, y su aplicación en zonas con bajas temperaturas debe ser analizado.

ESTABILIZACIÓN DEL SUELO CON CEMENTO



Foto: <https://victoryepes.blogs.upv.es>

- 3. Estabilización con emulsiones asfálticas.** Las emulsiones son dispersiones coloidales de asfalto en agua, que al ser mezcladas con materiales granulares forman una película asfáltica que envuelve las partículas, aumentando la cohesión, reduciendo la absorción de agua y mejorando la resistencia a la erosión superficial. Usualmente se utilizan emulsiones catiónicas para lograr una buena adherencia. Estabilizar mediante la utilización de emulsiones mejora la durabilidad superficial y la resistencia a la abrasión y es compatible con tratamientos superficiales adicionales. Pero requiere mezcla homogénea y temperatura controlada, genera menos resistencia estructural comparado con cemento o cal, y no es apto para suelos con alto contenido de finos o humedad elevada.

ESTABILIZACIÓN DEL SUELO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA



Foto: <https://victoryepes.blogs.upv.es/>

4. **Polímeros sintéticos y estabilizantes orgánicos.** Estos productos incluyen polímeros sintéticos (acrílicos, vinílicos), enzimas, lignosulfonatos, resinas naturales o aditivos a base de cloruros. Actúan formando una red física o química que une las partículas del suelo, creando una estructura menos permeable, más cohesiva y resistente al tráfico y la intemperie. Entre sus ventajas están su rápida aplicación y puesta en servicio, el que mejora la resistencia al agua y reduce la frecuencia de mantenimiento, y el hecho de que requiere bajo volumen de maquinaria pesada. Tiene como limitaciones su costo elevado por litro o kilo, sus resultados variables según el tipo de suelo, y que necesita validación previa mediante piloto de campo.

La estabilización química representa una herramienta poderosa y versátil para mejorar la estructura de los CBVT, especialmente cuando se enfrenta a suelos problemáticos o condiciones operativas exigentes. Su uso debe estar basado en criterios técnicos sólidos, con pruebas de campo y laboratorio, y un control cuidadoso de su ejecución. Incorporada correctamente, esta técnica puede ser determinante para lograr caminos más durables, resistentes y sostenibles.

Estabilización con geosintéticos

Los geosintéticos son materiales sintéticos fabricados con polímeros (como polietileno, polipropileno o poliéster), diseñados específicamente para cumplir funciones de refuerzo, separación, filtración, drenaje o contención en aplicaciones de ingeniería geotécnica. En caminos rurales de bajo volumen de tránsito, los geosintéticos se han convertido en una herramienta versátil y eficaz para estabilizar suelos problemáticos, extender la vida útil del camino y reducir los costos de mantenimiento, especialmente en contextos donde el reemplazo de suelos o la importación de materiales resulta costosa o inviable.

APLICACIÓN DE GEOSINTÉTICO COMO ALTERNATIVA PARA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS



Foto: www.slabperu.com

Sus principales funciones son:

- **Refuerzo:** incrementa la capacidad portante de suelos blandos al distribuir las cargas del tránsito, reduciendo deformaciones.
- **Separación:** impide la mezcla entre suelos finos de la subrasante y materiales granulares de la capa superior.
- **Filtración y drenaje:** permite el paso controlado del agua mientras retienen partículas finas, favoreciendo el control de humedad.

Para su aplicación existen tres tipologías de materiales que se pueden considerar:

1. **geotextiles**, que son láminas permeables, tejidas con alta resistencia a la tracción, o no tejidas con mayor capacidad de drenaje
2. **geogrillas**, que son estructuras reticuladas tridimensionales utilizadas principalmente para refuerzo estructural mejorando la capacidad de carga
3. **geoceldas**, que son estructuras tridimensionales con celdas de polímeros expandibles que se llenan con suelo, agregados u otros se aplican para incrementar la rigidez y reducir los desplazamientos laterales.

Los geosintéticos son una solución técnicamente robusta y eficiente para mejorar el desempeño estructural de los CBVT, especialmente en terrenos complicados o en zonas rurales donde se busca prolongar la vida útil con intervenciones de bajo mantenimiento. Aunque su aplicación requiere conocimientos técnicos y control constructivo, puede reducir significativamente el deterioro prematuro, los costos de mantenimiento y el uso excesivo de materiales no renovables, contribuyendo así a una infraestructura rural más resiliente y sostenible.

Criterios para seleccionar una técnica de estabilización

La correcta selección de la técnica de estabilización es un paso crítico en el diseño y ejecución de CBVT, ya que define en gran medida la durabilidad, eficiencia operativa, costos a lo largo del ciclo de vida, y la adaptabilidad al entorno físico y social. Elegir una solución adecuada implica considerar factores técnicos, económicos, ambientales y logísticos, que pueden variar significativamente entre regiones (Costa, Sierra y Selva) y según el tipo de suelo o condiciones del proyecto.

Los criterios para seleccionar la técnica de estabilización deben surgir de una evaluación multidimensional que contemple al menos los siguientes aspectos: tipo y condición del suelo, condiciones climáticas, volumen y tipo de tránsito, recursos disponibles y logísticas, y requerimientos ambientales y sociales.

Con base en estos criterios, en la siguiente tabla se presenta una comparación.

TABLA 3. CRITERIOS PARA SELECCIONAR LA TÉCNICA DE ESTABILIZACIÓN

TÉCNICA	TIPO DE SUELO	CLIMA RECOMENDADO	DURABILIDAD	COSTO RELATIVO	REQUIERE MAQUINARIA	OBSERVACIONES
Mecánica	Arenoso, granular	Todas	Media	Bajo	Baja a media	Fácil de aplicar y económica
Cal	Arcilloso	Húmedo/seco	Alta	Medio	Media	Requiere tiempo de curado
Cemento	Granular/cohesivo	Seco o moderado	Muy alta	Medio a alto	Alta	Rápido endurecimiento
Emulsión asfáltica	Granular	Árido/semiárido	Media	Medio	Media	Controla polvo, no aporta refuerzo estructural significativo
Geotextiles	Suelo blando	Húmedo, mal drenado	Alta	Medio	Baja	Ideal para separación y refuerzo
Geogrillas	Bases/Subbase granular	Todas	Alta	Medio a alto	Media	Mejora capacidad portante significativamente
Geoceldas	Muy blando	Alta humedad	Muy alta	Alto	Alta	Costosa pero muy eficaz

A modo de recomendación:

- Realizar estudios de suelos previos (incluyendo CBR, IP, granulometría, contenido de humedad, presencia de sales o materia orgánica) y definir con ello la sectorización respectiva, a efectos de estudiar tramos o segmentos de vía homogéneos aplicando herramientas como el método de las diferencias acumuladas.
- Aplicar análisis multicriterio para comparar técnicas, ponderando costo, desempeño, mantenimiento y aplicabilidad local.
- Considerar intervenciones por tramos homogéneos; no se necesita aplicar la misma técnica en todo el camino.
- Priorizar soluciones con menor necesidad de mantenimiento intensivo y mayor adaptabilidad al entorno rural.
- Documentar las decisiones técnicas mediante fichas de estabilización por tramo, con parámetros técnicos y resultados esperados.

La selección adecuada de la técnica de estabilización es clave para garantizar la funcionalidad, durabilidad y sostenibilidad de los CBVT. Esta elección debe

fundamentarse en criterios técnicos robustos, datos locales y una evaluación realista de las capacidades logísticas y operativas disponibles. No existe una solución única; por el contrario, el éxito radica en adaptar las técnicas al contexto territorial, climático, social y económico del proyecto.

Buenas prácticas, errores comunes y recomendaciones

A pesar del amplio conjunto de técnicas de estabilización disponibles, su eficacia en campo depende no sólo de la selección adecuada del método, sino también de la calidad de su ejecución, el control de procesos y la adaptación contextual a las características locales. En numerosos proyectos de CBVT los fracasos en la estabilización no se deben al método elegido, sino a errores evitables en la planificación, el diseño o la construcción.

A continuación, se establecen algunas buenas prácticas para ser tomadas en cuenta:

1. **Capacitación técnica del equipo ejecutor.** Esto es muy relevante ya que la formación previa del equipo técnico y operativo debe contar con los protocolos de trabajo claros según el tipo de estabilización seleccionada.
2. **Caracterización del suelo antes de intervenir.** Para esto es relevante ejecutar los estudios básicos del suelo para que con base en estos resultados se defina la técnica, la dosificación y los espesores de estabilización.
3. **Validación en campo de la técnica propuesta.** Se recomienda realizar tramos piloto o pruebas antes de aplicar la técnica en toda la longitud y evaluar el comportamiento bajo tránsito real. Además, se debe adoptar una lógica de tramos homogéneos, ya que no todo el camino requiere la misma técnica. Es preciso identificar secciones críticas o con condiciones particulares.
4. **Control riguroso durante la ejecución.** Se deben llevar los controles técnicos adecuados para que se cumplan las suposiciones en la aplicación del estabilizado.
5. **Implementación de adecuado drenaje.** Para que cualquier estabilización funcione se debe asegurar que se cuente con adecuados sistemas de drenaje, tanto superficial como subterráneo.
6. **Curado y protección post-ejecución.** Es importante no abrir al tránsito antes de alcanzar las resistencias mínimas dependiendo del tipo de estabilizador.

El éxito de una técnica de estabilización en CBVT no depende únicamente de la tecnología seleccionada, sino de planificación, ejecución y control correctos. Una intervención bien diseñada, pero mal ejecutada, perderá rápidamente su eficacia. En cambio, una técnica sencilla pero bien aplicada puede extender significativamente la vida útil del camino.

Las buenas prácticas deben formar parte de cualquier estrategia de mejora rural, especialmente en contextos donde cada intervención representa una inversión valiosa y de alto impacto social.

Técnicas de protección de la superficie

Dado que la mayoría de los CBVT no cuentan con una estructura de pavimento convencional, la capa superficial –ya sea afirmado, compactado o tratamiento bituminoso– cumple un rol crítico como primera barrera ante el tránsito y los agentes climáticos. Desde un punto de vista general este tipo de intervenciones buscan mantener la transitabilidad, reducir la generación de polvo, limitar la infiltración del agua, aumentar la resistencia a la abrasión y erosión superficial, y reducir las necesidades de mantenimiento de tipo correctivo durante la vida útil de la vía.

Es importante considerar que las técnicas de protección de la superficie pueden ser empleadas tanto en caminos bien conformados como en caminos con capas estabilizadas, y su aplicación debe ser parte integral del diseño vial.

La capa de protección superficial en CBVT no es un componente secundario, sino una herramienta clave de ingeniería para extender la vida útil de los caminos, reducir el impacto ambiental y social de su deterioro, y garantizar la conectividad rural de forma segura y sostenible. Su correcta selección, diseño y ejecución debe ser un pilar de toda intervención técnica sobre plataformas de rodadura de bajo volumen de tránsito.

Revestimientos pétreos

Estos procedimientos, también conocidos como revestimiento con capas de ripio o recubrimientos granulares, han demostrado ser una opción viable y económica para soluciones de corto plazo. Consisten en una capa superficial compuesta por materiales pétreos naturales (grava, o roca triturada) que se extiende sobre una capa de afirmado o una subrasante estabilizada, con los objetivos de disipar las cargas del tránsito vehicular, distribuyéndolas de forma más uniforme hacia las capas inferiores: proteger la plataforma de rodadura frente a la acción del agua, evitando la disgregación del material fino; y reducir la generación de polvo y barro, mejorando las condiciones sanitarias y de visibilidad.

Este tipo de solución, aunque básica, permite mejorar sustancialmente el desempeño funcional de los CBVT sin recurrir a técnicas más complejas o costosas como los tratamientos bituminosos.

Desde el punto de vista técnico, el diseño de este tipo de revestimientos se basa en los siguientes criterios:

- **Selección adecuada de materiales.** Se debe preferir materiales triturados angulosos con una gradación que vaya de 1" a 3", evitando que exista un alto contenido de finos.
- **Espesores tipo.** Dependiendo del tipo de tránsito y de la subrasante, la capa puede tener de 10 a 15 cm de espesor.
- **Compactación.** Esta etapa es relevante para lograr un adecuado funcionamiento del revestimiento. Se debe realizar con rodillo vibratorio y la compactación se debe realizar a la humedad óptima del material.
- **Pendiente transversal.** Las pendientes deben ser de entre 3% y 5%, a fin de favorecer el escurrimiento superficial y la rápida evacuación del agua.

Los recubrimientos pétreos requieren de maquinaria y pueden ejecutarse con mano de obra local. Su costo es bajo y su mantenimiento fácil. Los baches se pueden reparar con el mismo material y compactación. Se pueden emplear en zonas con difícil acceso a otros tipos de recubrimientos. Tienen una cierta resistencia a los efectos climáticos sin una pérdida inmediata de funcionalidad. Sin embargo, no eliminan el polvo por completo. Pueden generar proyección de partículas si no se compactan adecuadamente. Requieren mantenimiento periódico, especialmente en pendientes. En zonas de alta pluviosidad, pueden ser vulnerables a arrastre superficial si no hay un drenaje bien diseñado.

Los revestimientos pétreos representan una alternativa eficaz, económica y fácilmente replicable para proteger la superficie de los CBVT, especialmente en regiones donde las limitaciones logísticas y económicas dificultan la aplicación de tratamientos bituminosos. Su éxito depende de una adecuada selección del material, compactación, pendiente y, sobre todo, de un sistema de drenaje funcional. Deben considerarse como una solución técnica legítima dentro del espectro de estrategias de protección superficial rural.

Tratamientos superficiales bituminosos

Los tratamientos superficiales bituminosos (TSB) son técnicas ampliamente utilizadas para mejorar el comportamiento funcional y la durabilidad de los caminos. Consisten en la aplicación de capas delgadas de ligante bituminoso acompañadas por áridos seleccionados, cuyas funciones son sellar la superficie, reducir la infiltración de agua, controlar el polvo, aumentar la fricción y prolongar la vida útil del camino.

APLICACIÓN DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL COMO RECUBRIMIENTO



Foto: La Convención

Estas soluciones han sido probadas con éxito en numerosos proyectos y su correcta implementación puede representar un salto cualitativo significativo en la mejora de la conectividad rural.

Los TSB se clasifican por el número de capas aplicadas y su configuración. Su efectividad depende tanto del diseño como de la calidad de los materiales y de la ejecución en terreno, así como de la geometría (pendientes, radios de curvatura, entre otros) de las vías o zonas donde se aplique. En zonas rurales con tránsito ligero o moderado, son una solución escalable y sostenible.

- **Tratamientos superficiales simples (TSS).** Consisten en una sola aplicación de ligante bituminoso seguida de una capa de agregado mineral. Son la solución más económica para caminos con tránsito ligero. Se caracterizan por su bajo costo inicial, la utilización de equipamiento específico y la rapidez de su aplicación. Sin embargo, su durabilidad es reducida y son más susceptibles al desprendimiento de áridos, por lo que su uso debe considerar restricciones topográficas y la necesidad de mantenimiento más frecuente.
- **Tratamientos superficiales dobles (TSD).** Involucran la aplicación de dos capas sucesivas de ligante y agregado, lo que mejora la cobertura, sellado y resistencia mecánica. Son ampliamente usados como técnicas de bajo costo ya que ofrecen mayor durabilidad, mejor adherencia y resistencia al tránsito, y protección contra la humedad. Entre sus limitaciones está que se requiere de un mayor consumo de

materiales, de equipamiento más específico, conocimientos más especializados. Su éxito depende en gran medida de la compactación que se aplica entre las capas.

- **Tratamientos superficiales múltiples (TSM).** Estas alternativas, menos comunes, constan de tres o más capas de ligante y agregado, diseñadas para caminos de bajo volumen que reciben tránsito pesado con cargas importantes.

Respecto a la materialidad de la solución, los ligantes bituminosos utilizados son las emulsiones catiónicas de rotura rápida (CRS-2) y las emulsiones de rotura media (CMS-2h). La elección de la alternativa correcta depende de las condiciones climáticas y de los materiales existentes. Actualmente se vienen incorporando ligantes modificados con polímero o caucho, que promueven una mejor elasticidad, cohesión y durabilidad aunque con costos elevados. Los agregados deben tener alta dureza, forma cúbica y angular, y un bajo porcentaje de finos. Usualmente para los TSS se utiliza de 3/8" (9.5 mm) a 1/2" (12.7 mm) y para las capas de TSB o TSM se considera una mezcla con áridos de gradación mayor.

Sellos delgados y recubrimientos especiales

Los sellos delgados y los recubrimientos especiales son técnicas de preservación vial que consisten en la aplicación de mezclas bituminosas de bajo espesor sobre una superficie previamente estabilizada o tratada. Sus fines principales son mantener la integridad funcional del camino, protegerlo del deterioro prematuro y mejorar sus condiciones de seguridad y confort, extendiendo su vida útil de forma eficiente y sostenible. Aunque estas tecnologías han sido más comunes en otros ámbitos, su uso en CBVT con función estratégica (o en tramos rurales con tránsito agrícola o turístico) se ha incrementado gracias a su desempeño técnico y a la evolución de equipos y emulsiones adaptadas a contextos de bajo volumen. A continuación, se detallan las alternativas de revestimientos más utilizados.

- **Slurry seal.** Corresponde a una mezcla en frío compuesta por una emulsión asfáltica catiónica, áridos finos, agua y aditivos específicos (retardadores, estabilizadores) que se aplica en capas delgadas (3–6 mm) sobre superficies estabilizadas o tratadas. Su función principal es sellar superficialmente, mejorar la macrotextura superficial y controlar el polvo, proporcionando una capa uniforme y continua. Se caracteriza por ser de rápida aplicación y de bajo consumo de materiales y equipamiento, aunque no aporta capacidad estructural y tiene una durabilidad moderada aun con un mantenimiento apropiado.
- **Micropavimento.** Mezcla de emulsión asfáltica con polímeros, áridos triturados duros y de gradación controlada, y aditivos químicos, aplicada con equipos autopropulsados. A diferencia del *slurry seal*, su formulación permite un fraguado rápido incluso en condiciones más exigentes, y una mayor resistencia mecánica y cohesión superficial. Son de rápida aplicación y permiten una apertura rápida al tránsito, su durabilidad

es mayor, lo que lo convierte en una excelente alternativa para zonas con curvas y pendientes. Sin embargo, requiere de equipamientos especializados, y su costo inicial es mayor en comparación con otras alternativas de recubrimientos.

APLICACIÓN DE MICROPAVIMENTO COMO RECUBRIMIENTO



Foto del autor

Aparte de los dos indicados anteriormente, existen otras alternativas de sellos delgados, como Otta Seal, Cape Seal y Chip Seal, que también son considerados como tratamientos especiales. Su aplicación debe ser claramente analizada.

Los sellos delgados y recubrimientos especiales son una excelente alternativa para preservar y mejorar CBVT existentes sin necesidad de inversiones mayores. Permiten prolongar la vida útil de tratamientos previos, aumentar la seguridad vial y mantener el nivel de servicio con intervenciones accesibles y escalables. Su implementación, sin embargo, requiere una evaluación cuidadosa del estado del camino base, la disponibilidad de materiales y equipos, y capacitación técnica adecuada para su ejecución.

Innovación en recubrimientos bituminosos

En el contexto de la infraestructura vial rural, los recubrimientos bituminosos han evolucionado significativamente, permitiendo soluciones más resilientes, sostenibles y adaptadas a condiciones exigentes como las presentes en los CBVT. A diferencia de los tratamientos tradicionales, las innovaciones actuales integran tecnologías avanzadas de

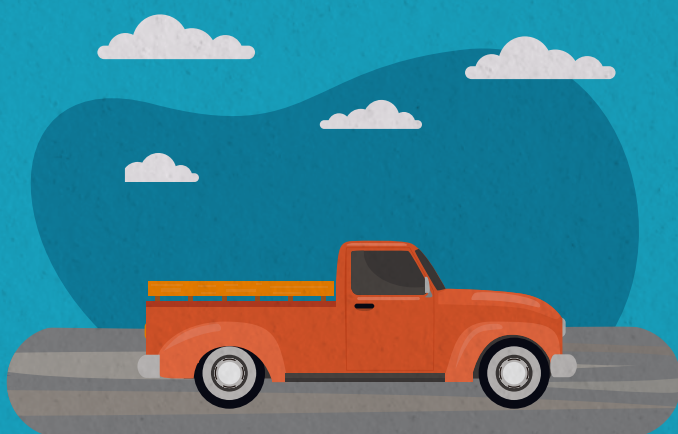
materiales, nuevos aditivos, emulsiones mejoradas y métodos de aplicación optimizados, lo que permite ampliar la vida útil del camino, reducir costos de mantenimiento y disminuir el impacto ambiental.

- **Asfaltos modificados con polímeros (PMB).** Consisten en la incorporación de aditivos poliméricos al ligante bituminoso convencional, con el objetivo de mejorar sus propiedades reológicas, su resistencia a deformaciones permanentes, su flexibilidad a bajas temperaturas y su durabilidad frente al envejecimiento. Los polímeros más utilizados son elastómeros (SBS), plastómeros (EVA) y copolímeros reciclados derivados de plásticos posconsumo. Su principal ventaja es el incremento de la vida útil del recubrimiento respecto al uso de asfaltos convencionales.
- **Emulsiones bituminosas mejoradas.** Este tipo de materiales representan una mejora significativa respecto a las emulsiones convencionales. Al estar formuladas con modificadores poliméricos, mejoradores de adherencia y estabilizadores, ofrecen un rendimiento superior en caminos rurales.
- **Utilización de materiales reciclados.** Con el objetivo de promover la sostenibilidad y la economía circular, varias tecnologías recientes incorporan materiales reciclados como parte del sistema de recubrimiento: caucho reciclado de neumáticos, plásticos reciclados y otros materiales que son considerados como residuos de otras industrias para reemplazar el agregado.
- **Nuevos métodos de aplicación.** Además de las innovaciones en materiales, existen avances en las tecnologías de aplicación que mejoran el rendimiento de los recubrimientos bituminosos. Los sistemas automatizados de dosificación de ligante y árido garantizan uniformidad y reducen errores humanos. El control por sensores térmicos y de densidad en tiempo real asegura una aplicación óptima, incluso en condiciones cambiantes. Y los equipos autopropulsados con sistema de geoposicionamiento permiten trazabilidad y repetibilidad de tratamientos en zonas rurales dispersas.

La adopción de recubrimientos bituminosos innovadores en los CBVT representa un paso clave hacia una infraestructura más resiliente, económica y sostenible, especialmente en contextos rurales donde los recursos son limitados y los desafíos geográficos y climáticos son significativos. La implementación exitosa de estas tecnologías depende no sólo del material utilizado, sino también del diseño técnico, la preparación adecuada de la plataforma, y la capacitación del personal que ejecuta las obras. Integrar enfoques como asfaltos modificados, emulsiones avanzadas, materiales reciclados y sistemas de control inteligente puede transformar significativamente la calidad de las vías rurales y su impacto en las comunidades, sobre todo en lo referente a la durabilidad y la sostenibilidad de las soluciones de ingeniería adoptadas.

CAPÍTULO

7



Gestión de activos viales

CAPÍTULO 7

Gestión de activos viales

En este capítulo se aborda la gestión de activos viales en los CBVT, enfatizando la necesidad de implementar sistemas modernos y eficientes para la planificación, mantenimiento y optimización de la infraestructura vial rural en el Perú. Se inicia con la importancia de la gestión de activos viales, explicando cómo una administración estructurada y basada en datos permite reducir costos, mejorar la durabilidad de los caminos y garantizar la conectividad rural a largo plazo. Luego, se detallan los elementos clave de un Sistema de Gestión de Activos Viales (SGAV), incluyendo los inventarios, que son de especial importancia respecto a la captura, levantamiento y gestión de los datos para el éxito en la gestión de activos viales, la planificación de mantenimiento y la asignación eficiente de recursos. Se presenta innovaciones tecnológicas para el desarrollo de los inventarios, con el uso de herramientas como GIS y drones. Además, se analiza el mantenimiento basado en desempeño y el monitoreo de condición vial, destacando modelos de gestión preventiva frente a métodos tradicionales reactivos. Finalmente, se explora las aplicaciones de inteligencia artificial en planificación vial, con sistemas de predicción de deterioro y optimización de intervenciones, así como la digitalización de la gestión vial rural, promoviendo la implementación de plataformas inteligentes para la toma de decisiones basadas en datos. Se hace énfasis en concientizar a las agencias y/o tomadores de decisiones sobre la necesidad de considerar este escenario, y la posibilidad de capturar esta data de manera oportuna en programas de inversión en ejecución, como el caso de PROREGIÓN.

Importancia de la gestión de activos viales en CBVT

La gestión de activos viales (GAV) es un proceso estratégico, sistemático y basado en datos para mantener, operar, renovar y mejorar la infraestructura vial de manera eficiente y sostenible.

Desde una perspectiva técnica y de planificación, un sistema de gestión de activos viales permite a las agencias públicas tomar decisiones fundamentadas sobre intervenciones prioritarias, inversiones eficientes y mantenimiento oportuno. Este enfoque evita el deterioro acelerado de la infraestructura, lo que reduce los costos del ciclo de vida de las vías y mejora el nivel de servicio para los usuarios (De Solminihac, 2018).

En los beneficios tangibles de implementar un sistema de GAV se incluyen:

- Reducción de costos operativos y de mantenimiento, mediante intervenciones preventivas y planificación anticipada.

- Prolongación de la vida útil de los activos viales, evitando el deterioro prematuro.
- Mejor aprovechamiento de los recursos públicos, al establecer prioridades con base en información objetiva.
- Accesibilidad y confiabilidad del sistema vial, incluso en contextos climáticos adversos.

Además existen beneficios intangibles, como el aumento de la seguridad vial, la mejora del confort del usuario y la reducción del impacto ambiental, al evitar intervenciones tardías y costosas que impliquen mayor consumo de materiales y energía.

En el ámbito rural, una gestión efectiva de los activos viales permite garantizar conectividad de manera permanente y segura. Una red adecuadamente gestionada puede resistir mejor los embates de lluvias intensas, inundaciones o deslizamientos.

Incorporar una perspectiva de gestión de activos viales permite identificar vulnerabilidades estructurales y abordarlas de manera preventiva. La experiencia internacional demuestra que países poco desarrollados han logrado significativas mejoras en eficiencia mediante la implementación de Sistemas de Gestión de Activos Viales (SGAV) integrados a sus procesos de planificación y operación. Estos sistemas permiten monitorear en tiempo real el estado de la infraestructura, simular escenarios de inversión y priorizar tramos críticos para la intervención en ALC.

Sin embargo, la aplicación de estos sistemas ha sido más limitada, aunque existen experiencias exitosas como el uso de modelos multicriterio en Chile o las herramientas de análisis costo-beneficio extendidas en México y Brasil. En el caso de Perú, iniciativas como el Programa de Infraestructura Vial para la Competitividad Regional PROREGIÓN representan una oportunidad clave para incorporar de forma estructurada criterios de gestión de activos, especialmente mediante la captura y uso sistemático de datos desde el inicio de los proyectos.

Por tanto, implementar la gestión de activos viales en los CBVT no sólo responde a una necesidad técnica, sino también a un compromiso con la sostenibilidad, la equidad territorial y la eficiencia de la inversión pública. La GAV constituye el puente entre la planificación estratégica de infraestructura y la experiencia diaria del usuario rural.

Elementos clave de un SGAV

Un Sistema de Gestión de Activos Viales (SGAV) eficaz es la columna vertebral de una administración vial moderna, eficiente y orientada a resultados. Su diseño y operación deben responder a un enfoque integral que considere tanto el mantenimiento físico de la infraestructura como la optimización del ciclo de vida de los activos, la transparencia en la toma de decisiones, y la sostenibilidad financiera y operativa del sistema vial en su conjunto. Este tipo de gestión cobra particular relevancia en redes de CBVT.

Bajo el marco normativo de la familia ISO 55000 y las recomendaciones internacionales del Manual de Gestión de Activos Viales de la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC), un SGAV eficaz se fundamenta en una estructura lógica y secuencial que abarca desde la definición de políticas institucionales y objetivos estratégicos, hasta la implementación de mecanismos de monitoreo, retroalimentación y mejora continua. Este sistema permite vincular la planificación de largo plazo con la operación diaria, articulando políticas públicas con criterios técnicos, herramientas tecnológicas y procesos participativos, especialmente en contextos rurales.

FIGURA 6. SISTEMA DE GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURA VIAL



Fuente: PIARC (Miguel Valdés)

A continuación, se detallan los principales componentes de un SGAV robusto:

1. **Política y objetivos de gestión de activos.** La política de gestión de activos define el marco general de actuación y representa el compromiso institucional con una administración vial basada en resultados. Según la norma ISO 55001, esta política debe estar alineada con los objetivos estratégicos de la organización y proporcionar la base para establecer metas coherentes, realistas y medibles. En el contexto de CBVT, la política debe incorporar objetivos de equidad territorial, accesibilidad rural, desarrollo productivo local, y sostenibilidad técnica y ambiental. El Manual de PIARC resalta que una política eficaz debe estar claramente documentada, debe ser comunicada a todos los niveles y debe contar con el respaldo político necesario para su implementación.
2. **Estrategia y planes de gestión de activos.** La estrategia de gestión de activos representa el marco técnico-operativo mediante el cual se implementa la política general del sistema de gestión de activos viales. Este componente es esencial para traducir la visión institucional en acciones concretas, estructuradas en plazos definidos y articuladas con la realidad técnica, presupuestaria y territorial. La estrategia debe abordar las características específicas de la red vial bajo administración (tipo de activos, nivel de servicio requerido, criticidad funcional) y definir claramente los procesos para alcanzar y mantener los objetivos de desempeño establecidos.

Un aspecto clave de la estrategia es la definición del nivel de servicio. Este concepto se refiere al estándar técnico, funcional y operativo que debe cumplir un activo vial a lo largo de su vida útil. Los niveles de servicio pueden incorporar variables como transitabilidad permanente, condiciones de seguridad, comodidad de viaje, capacidad estructural, accesibilidad en época de lluvias o tiempo de respuesta frente a emergencias. En el contexto de CBVT, estos niveles deben ser definidos con un enfoque realista, gradual y adaptado a la capacidad de gestión local, priorizando el acceso continuo y la resiliencia.

Los planes de gestión de activos, derivados de la estrategia, son documentos operativos que establecen metas específicas de corto, mediano y largo plazo (habitualmente 5, 10 y 20 años), organizadas en función de la evolución proyectada del estado de los activos y de los recursos disponibles. Los planes de gestión de activos, derivados de esta estrategia, deben estructurarse considerando dos escalas complementarias:

- A nivel de red, se analizan de manera agregada las condiciones de los activos y se definen políticas globales de intervención, mantenimiento y financiamiento.
- A nivel de proyecto, se desarrollan planes específicos de conservación, rehabilitación o mejora para tramos críticos, con detalle técnico, económico y operativo.

Este enfoque dual permite optimizar la asignación de recursos, priorizando inversiones en función del valor estratégico de las vías, su criticidad funcional, su nivel de deterioro y su contribución al desarrollo territorial.

Para apoyar este proceso de planificación estratégica, existen diversas herramientas técnicas que permiten modelar el comportamiento de los activos, simular escenarios de intervención y calcular indicadores de desempeño técnico y económico. Una de las más ampliamente difundidas es HDM-4. Permite realizar análisis de red y de proyecto, modelar el deterioro vial, evaluar alternativas de intervención, calcular el costo del ciclo de vida de las inversiones, y estimar beneficios sociales, como reducción de costos de operación vehicular y tiempo de viaje. HDM-4 es particularmente útil para redes de CBVT cuando se adapta a contextos rurales, mediante calibración de modelos y uso de inventarios locales.

HDM - 4



Foto: www.hdmglobal.com

Otra herramienta que está siendo ampliamente implementada en distintas entidades de gestión de activos es el software ICARO. Es una herramienta especializada en la gestión de activos viales desarrollada por el Grupo RAUROS. Está diseñada para facilitar la gestión integral de caminos mediante un enfoque basado en datos y tecnología. Su interfaz amigable y modular ha sido aplicada exitosamente en entornos con redes viales extensas y recursos limitados, lo que la convierte en una solución ideal para gobiernos locales y regionales que gestionan CBVT.

ICARO – ROAD ASSET MANAGEMENT SYSTEM

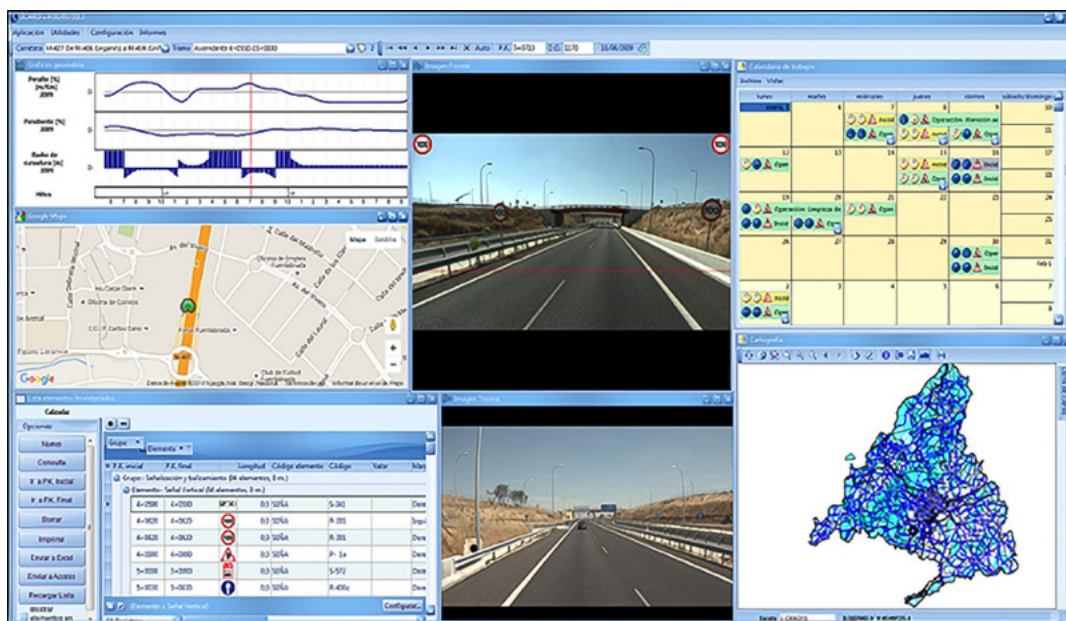


Foto: www.raurosgroup.com/icaro

Estos planes de gestión deberían incluir como mínimo:

- Diagnóstico de la situación actual de la red y del estado de los activos.
- Identificación de brechas entre el estado actual y el nivel de servicio deseado, proyectando el deterioro y los posibles requerimientos de intervención.
- Priorización de intervenciones en función de la condición, la criticidad funcional y los riesgos.
- Estrategia de intervención que combine acciones de mantenimiento rutinario, conservación periódica, rehabilitación estructural y reemplazo, a efectos de mantener un nivel de servicio mínimo aceptable.
- Cronograma de ejecución y requerimientos presupuestarios para cada período.
- Asignación de responsabilidades institucionales y mecanismos de revisión y monitoreo.

Las referencias internacionales recomiendan que estos planes no sean documentos aislados, sino que estén estrechamente vinculados a los procesos de planificación sectorial y presupuestación plurianual, permitiendo una integración realista con las capacidades fiscales y de ejecución de los gobiernos nacionales, regionales o locales. Además, deben actualizarse periódicamente –al menos cada cinco años– para incorporar nueva información, reevaluar prioridades o responder a cambios en el entorno operativo (climáticos, sociales, institucionales o tecnológicos).

Finalmente, una estrategia bien diseñada y sus correspondientes planes operativos deben incorporar indicadores de desempeño (en inglés *Key Performance Indicators*, o KPI), responsabilidades institucionales claras, y mecanismos de monitoreo que permitan evaluar su cumplimiento y retroalimentar el ciclo de mejora continua. Esto garantiza que el SGAV funcione como un sistema adaptativo y evolutivo, no sólo como una herramienta técnica, sino como un instrumento de gobernanza y gestión territorial.

Inventario y registro de activos

Este componente es el corazón operativo del SGAV. La base para una toma de decisiones racional, transparente y costo-efectiva depende en gran medida de la calidad, completitud y actualización del inventario vial. El inventario consiste en la identificación, caracterización, recopilación, digitalización y mantenimiento sistemático de información sobre todos los activos físicos que componen la red vial, incluyendo tanto elementos estructurales como funcionales y de seguridad. Es decir, implica tomar datos como los siguientes: tipo de vía, longitud, ubicación, características geométricas, materiales, estructuras, obras de drenaje, taludes, señalización, y condiciones físicas, entre otros.

En el caso de los CBVT, el levantamiento de información debe adaptarse a los recursos disponibles y la escala territorial, priorizando soluciones de bajo costo y alta eficiencia. Para ello, existen actualmente múltiples herramientas tecnológicas que facilitan el proceso de captura y actualización de datos:

- Sistemas de Información Geográfica (GIS): permiten estructurar la información de forma espacial y visual, facilitando el análisis multicriterio, planificación basada en zonas de influencia y conexión con otras bases de datos socioeconómicas.
- Drones y vehículos no tripulados: permiten realizar inspecciones aéreas de alta resolución en zonas inaccesibles o con topografía desafiante.
- Imágenes satelitales de alta resolución: útiles para coberturas regionales, detección de cambios en el entorno y verificación de condiciones estructurales visibles.
- Aplicaciones móviles y GPS: han sido integradas con éxito en experiencias comunitarias o de gobiernos subnacionales para el levantamiento colaborativo de información, capacitando a técnicos locales, promotores viales o ingenieros zonales en el registro georreferenciado de activos.
- Sensores - Internet of Things (IoT): aunque aún con una adopción incipiente en el mundo rural, ofrecen la posibilidad de monitorear en tiempo real variables como humedad de subrasante, temperatura del pavimento, presencia de agua en cunetas o vibración de estructuras.

El registro de activos debe almacenarse en una base de datos dinámica, interoperable, georreferenciada y auditable, que permita no sólo visualizar la información, sino también analizarla con herramientas analíticas y vincularla con indicadores de desempeño, presupuestos y planes de mantenimiento. La norma ISO 55000 establece que los registros deben ser confiables, trazables, actualizados y accesibles, formando parte de un sistema integrado de gestión. Además, deben responder a criterios de gobernanza de datos, definiendo roles y responsabilidades institucionales para su recolección, validación, actualización y custodia.

Es muy recomendable que los sistemas de inventario se estructuren con formatos estandarizados, tanto en los campos de información como en los protocolos de intercambio de datos, a fin de facilitar la interoperabilidad entre diferentes instituciones (gobiernos regionales, municipios, ministerios, entidades técnicas, cooperantes), lo cual es esencial en redes de CBVT donde la gestión es frecuentemente descentralizada. Además, se recomienda incorporar elementos adicionales como la criticidad funcional de la vía, el grado de vulnerabilidad frente al cambio climático (zonas con alta exposición a lluvias, deslizamientos, inundaciones), y la existencia de poblaciones, escuelas, centros de salud o mercados cercanos, a fin de reforzar el enfoque territorial e inclusivo de los sistemas de gestión de activos.

Un inventario bien construido no sólo facilita la programación eficiente de recursos, sino que también fortalece la transparencia, la rendición de cuentas, la priorización objetiva y la sostenibilidad técnica de los sistemas de conservación y mejora de la red vial rural. Sin embargo, para que este instrumento cumpla efectivamente su propósito, es fundamental que el inventario sea actualizado de forma periódica y sistemática, integrando los cambios en las condiciones de la infraestructura, la incorporación de nuevos activos y las variaciones en el uso o funcionalidad de los caminos. Sólo mediante su mantenimiento constante podrá consolidarse como una herramienta confiable para la toma de decisiones y la planificación a corto, mediano y largo plazo.

Evaluación del estado y desempeño de los activos

Evaluación del estado. Con el inventario completo y estructurado, el siguiente paso en el ciclo de gestión de activos viales es la evaluación de la condición de cada elemento de la red. Este proceso es fundamental para identificar necesidades de intervención, priorizar recursos, actualizar planes de mantenimiento y alimentar modelos de proyección del comportamiento de los activos a lo largo de su vida útil. La evaluación puede abordarse desde dos enfoques complementarios que darán origen a los principales KPI: los cualitativos y los cuantitativos.

Métodos cualitativos. Son aquellos basados en inspección visual sistemática, llevadas a cabo por personal capacitado con el apoyo de fichas de campo estandarizadas, aplicaciones móviles o herramientas de captura georreferenciada. Se utilizan escalas de deterioro (por ejemplo, *bueno, regular, malo, muy malo*), codificación de patologías

(grietas, baches, desprendimientos, erosión, obstrucción de drenajes) y registro fotográfico. Aunque de bajo costo, estos métodos presentan limitaciones en la precisión y dependen del criterio del evaluador, por lo que su confiabilidad puede variar.

Métodos cuantitativos. Estos métodos permiten obtener mediciones objetivas, comparables y repetibles del estado físico de la vía, facilitando análisis técnicos, alimentando modelos de deterioro y justificando presupuestos ante autoridades o financiadores. Entre los principales parámetros e instrumentos utilizados se incluyen:

1. Rugosidad superficial (en inglés International Roughness Index, IRI): uno de los indicadores más utilizados para medir el confort de rodadura y la regularidad longitudinal de la vía. Se puede medir con los siguientes equipos:

- **Perfilómetro láser:** de alta precisión y de alto rendimiento, en la clasificación del Banco Mundial corresponde a la clase I. Permite la toma continua del perfil longitudinal de la vía para posteriormente proceder con la determinación del valor IRI. Dada sus características estos equipos son recomendables para zonas pavimentadas.

PERFILÓMETRO LÁSER



Foto: www.arbbsystems.com

- **Rugosímetros:** son considerados como equipos de clase III según la clasificación del Banco Mundial, ya que no miden directamente el perfil longitudinal de la vía sino obtienen un seudo perfil que posteriormente puede correlacionarse para determinar la rugosidad. Actualmente existen muchas alternativas, pero los que han tomado más relevancia son los basados en aplicaciones móviles enlazadas a acelerómetros.

De hecho, están siendo ampliamente utilizados en caminos rurales por su bajo costo y porque permiten realizar monitoreos rápidos y orientativos.

RUGOSÍMETRO ELECTRÓNICO



Foto: www.arrbsystems.com

2. Deflexión de pavimento (medición estructural): permite evaluar la capacidad de carga del pavimento, detectando debilitamientos o fallas en capas inferiores. Este tipo de equipamiento forma parte de los análisis para definir soluciones y optimizar las inversiones. Dentro de las tecnologías actuales se pueden mencionar:

- **Falling Weight Deflectometers (FWD):** equipo estándar a nivel internacional para mediciones en pavimentos flexibles y rígidos. Permite simular cargas de tránsito y registrar la deflexión de la superficie. Este tipo de equipo se utiliza principalmente para caminos pavimentados.

DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD)



Foto: <https://www.sweco.dk/>

- **Light Weight Deflectometer (LWD):** equipo portátil diseñado para caminos no pavimentados o zonas de difícil acceso. Es de particular utilidad para CBVT debido a su bajo costo, facilidad de transporte y aplicabilidad en campo.

DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO LIVIANO (LWD)



Foto: <https://www.sweco.dk/>

- **Traffic Speed Deflectometer (TSD):** Recientemente en el mercado han surgido otras alternativas para evaluar deflexiones con equipo de alto desempeño. El TSD permite realizar evaluaciones de manera continua sin detener el tránsito, por lo que su uso se ha impulsado en las redes viales primarias. A medida que esta tecnología se haga accesible y de adapte, se podrá aplicar a CVBT.

DEFLECTÓMETRO A VELOCIDAD DE TRÁNSITO (TSD)



Foto: www.rrbsystems.com

3. Evaluación de la condición superficial. Se trata de la cuantificación de grietas, baches, desprendimientos de agregados, pérdida de textura o deformaciones plásticas (como el ahuellamiento) tanto en su extensión como en su severidad. Este registro permite inferir las causas técnicas de las fallas y definir estrategias de mantenimiento apropiadas (sellado de fisuras, bacheo, recapeo, etc.). La evaluación se puede realizar mediante distintos métodos y tecnologías:

- La inspección visual, ampliamente utilizada, consiste en recorrer los tramos de interés y registrar manualmente los tipos de deterioro observados, utilizando fichas codificadas o aplicaciones móviles con campos preestablecidos. Se apoya en criterios técnicos normalizados y protocolos definidos para asegurar la coherencia entre evaluadores. Si bien su precisión depende del entrenamiento del personal, sigue siendo una herramienta eficaz cuando se aplica de forma sistemática y con protocolos claros.
- Los sistemas automatizados Laser Crack Measurement Systems (LCMS) permiten el levantamiento continuo y automatizado de información sobre el estado superficial del pavimento, incluyendo grietas longitudinales, transversales, en bloque, piel de cocodrilo, baches, pérdida de textura y fisuras por fatiga. Estos equipos utilizan sensores láser de alta velocidad, cámaras estereoscópicas y procesamiento de imágenes para generar modelos tridimensionales y mapas georreferenciados de deterioro. Su aplicación en CBVT puede ser particularmente útil en tramos pavimentados o caminos críticos, donde se justifica una evaluación detallada y precisa, o como parte de monitoreos periódicos en redes rurales priorizadas.

LASER CRACK MEASUREMENT SYSTEM (LCMS4)



Foto: www.pavimetrics.com

- En los últimos años, se han desarrollado herramientas basadas en video y procesamiento con inteligencia artificial, que permiten procesar imágenes capturadas desde vehículos o drones y detectar automáticamente los tipos y ubicaciones de deterioros. Mediante redes neuronales convolucionales (CNN) entrenadas con imágenes de pavimentos, estos sistemas pueden clasificar y cuantificar defectos con alta precisión y velocidad. Este enfoque es ideal para CBVT, donde se busca una alternativa económica, no intrusiva y escalable, ya que puede implementarse con cámaras comerciales y procesarse localmente o en la nube. Además, puede combinarse con otras fuentes de datos (GPS, GIS, sensores móviles) para generar mapas dinámicos del estado superficial de la red.

Estas tecnologías permiten una caracterización objetiva del estado superficial de los caminos, y ofrecen ventajas en términos de rapidez, repetibilidad, cobertura y reducción de la subjetividad del evaluador. Su integración en los sistemas de gestión de activos viales es una tendencia creciente en ALC y puede ser decisiva para fortalecer la capacidad técnica de gobiernos regionales o locales con recursos limitados.

4. Evaluación de fricción y textura superficial. La fricción entre el neumático y la superficie de rodadura, así como la textura superficial del pavimento o capa de rodadura, son parámetros fundamentales para garantizar la seguridad vial, especialmente en contextos rurales donde la topografía, el clima y el mantenimiento irregular pueden aumentar el riesgo de accidentes por pérdida de adherencia. En los CBVT, la evaluación de estas propiedades cobra particular relevancia para los

caminos pavimentados. La capacidad de frenado, la resistencia al deslizamiento en condiciones húmedas y la evacuación eficiente del agua dependen directamente de estas características. Estas evaluaciones se realizan con los siguientes equipamientos:

- **Fricción superficial:** la fricción o resistencia al deslizamiento puede ser evaluada con equipos adaptables al entorno rural. El Péndulo Británico (British Pendulum Tester, BPT) es ampliamente utilizado a nivel mundial por su portabilidad, bajo costo y buena correlación con condiciones reales de deslizamiento y por equipos portátiles especializados como el GripTester o Mu Meter, que son remolcados por vehículos ligeros. Operan mediante un neumático de prueba en contacto con el pavimento, midiendo la fuerza de fricción longitudinal. Su ventaja es la posibilidad de realizar recorridos largos y generar perfiles continuos de fricción.

GRIPTESTER



(Foto: www.findlayirvine.com)

- **Textura superficial:** también denominada como macrotextura, está directamente relacionada con la capacidad drenante de la superficie del pavimento. Se puede medir con el método de la mancha de arena, de bajo costo y aplicable en campo con recursos mínimos. También mediante texturómetros láser, usualmente asociados a los equipos de perfilometría láser.

TABLA 4. CARACTERÍSTICAS DE LA MACRO Y MICROTEXTURA

CARACTERÍSTICA	MACROTEXTURA	MICROTEXTURA
Tamaño de las irregularidades	Irregularidades visibles a simple vista, generalmente superiores a 0.5 mm	Irregularidades microscópicas generalmente menores a 0.5 mm
Escala	Escala visible, mayor tamaño de las asperezas	Escala microscópica, irregularidades pequeñas
Impacto en la fricción	Afecta la fricción dinámica y el drenaje del agua	Afecta la fricción estática y la adherencia en condiciones húmedas
Medición	Mediante la profundidad media de textura (mancha de arena) o mediante texturómetros	Mediante el coeficiente de fricción en condiciones húmedas

5. Evaluación de estructuras (puentes) y drenajes. Los puentes y estructuras mayores conforman los elementos más críticos de la red vial rural, ya que aseguran la continuidad física del camino sobre cursos de agua, quebradas, depresiones o zonas de riesgo geotécnico. Su condición define en muchos casos si una vía se mantiene operativa o queda completamente interrumpida. En el contexto de los CBVT, donde las alternativas de ruta son escasas y los tiempos de respuesta ante emergencias suelen ser lentos, la evaluación periódica y sistemática de estas infraestructuras es vital para garantizar la conectividad, la seguridad y la resiliencia territorial. La inspección de puentes debe considerar dos dimensiones clave: su condición estructural (capacidad de carga, estabilidad, estado de materiales) y su capacidad hidráulica y funcional (paso de caudales, integración con la vía y los accesos). Los aspectos más relevantes a evaluar incluyen la corrosión, las fisuras, las deformaciones o desprendimientos en elementos estructurales (apoyos, vigas, tableros), el desgaste en las juntas, los aparatos de apoyo y conexiones, la condición de las barandas y dispositivos de seguridad, la socavación en estribos y cimentaciones, la alineación estructural y los asentamientos diferenciales, la evaluación hidráulica del cauce y su interacción con el puente (sedimentos, obstrucciones, arrastre de materiales, erosión del lecho), y la estabilidad de accesos y plataformas de aproximación. Las tecnologías más utilizadas para evaluación son:

- Inspección visual sistematizada con fichas técnicas adaptadas al entorno rural.
- Drones con cámaras de alta resolución para visualizar zonas inaccesibles.
- Fotogrametría y escaneo 3D para generar modelos digitales del puente y detectar deformaciones.
- Sensores portátiles para monitorear vibraciones, inclinaciones, humedad en materiales y detección temprana de fallas.

- Pruebas de carga controladas, en estructuras de mayor riesgo o antigüedad.
- Pruebas de ultrasonido y ensayos no destructivos para la calidad de los materiales.

El registro e integración de esta información en el SGAV permite priorizar intervenciones preventivas o correctivas, evitar fallas catastróficas, y establecer rutas alternas o planes de contingencia en caso de interrupciones. Además, contribuye a la planificación plurianual de inversiones y a la actualización del inventario estructural nacional.

Los elementos de drenaje y estructuras menores, como alcantarillas, cunetas, badenes, zanjas de coronación, pasos de agua y muros de contención, cumplen funciones esenciales para preservar la estabilidad de la plataforma vial y mitigar procesos de deterioro por acción del agua superficial o subsuperficial. En zonas rurales con lluvias intensas o geografía compleja (como en la Sierra o la Selva), su mal funcionamiento puede generar colapsos localizados, cortes recurrentes, erosión severa, socavaciones y pérdida de soporte en taludes y calzada. Los parámetros a inspeccionar son las obstrucciones por sedimentos, los residuos o vegetación, el colapso estructural (aplastamiento, fisuras, desplazamientos), la erosión del lecho o taludes adyacentes, la pérdida de sección hidráulica efectiva por acumulación o deformación, las fallas en los elementos de transición (bordes entre calzada y estructura), y las deficiencias en el alineamiento, la pendiente o la conectividad funcional entre los drenajes. Para la inspección de estos elementos básicamente se utilizan las mismas tecnologías que para puentes.

Predicción del desempeño futuro

La planificación eficiente de la infraestructura vial requiere no sólo conocer el estado actual de los activos, sino también prever su evolución futura, para adoptar estrategias de intervención oportunas y costo-efectivas. Para ello, los modelos de deterioro representan herramientas fundamentales dentro de los Sistemas de Gestión de Activos Viales (SGAV), ya que permiten simular y anticipar el comportamiento de los elementos viales frente a diferentes escenarios de uso, carga, clima, condiciones constructivas y estrategias de mantenimiento. Estos modelos permiten responder preguntas clave, como ¿cuánto tiempo más puede mantenerse un camino en condiciones aceptables sin intervención?, ¿qué efecto tendrá el aplazamiento de una actividad de conservación?, ¿qué combinación de tratamiento resulta más rentable en el largo plazo?, y ¿qué impacto tiene el cambio climático en la durabilidad de ciertos segmentos críticos?

Los modelos de deterioro pueden clasificarse en función de su enfoque metodológico:

- **Empíricos:** derivados de datos históricos observados en campo (por ejemplo, curvas de evolución del IRI o pérdida de capacidad estructural con el tiempo). Son simples, rápidos de aplicar y especialmente útiles en CBVT sobre los que sólo se dispone de información básica.

- **Mecanísticos-empíricos:** integran principios de mecánica de materiales y estructuras con calibración empírica. Simulan el comportamiento de capas de pavimento frente a cargas y condiciones ambientales. Se aplican frecuentemente en proyectos con datos de ensayo o diseño detallado.
- **Probabilísticos y estocásticos:** incorporan la incertidumbre inherente a los procesos de deterioro, utilizando distribuciones estadísticas o cadenas de Markov para estimar la probabilidad de transición entre estados de condición. Útiles para gestionar riesgo en decisiones de mantenimiento.
- **Predictivos basados en inteligencia artificial (IA):** algoritmos de aprendizaje automático como redes neuronales, árboles de decisión o modelos de regresión no lineal que permiten construir funciones de deterioro adaptativas, especialmente cuando existen grandes volúmenes de datos (*big data*). Ya se están aplicando en redes rurales en países como India, Colombia o Sudáfrica.

Los modelos de deterioro más utilizados integran variables como tipo de estructura del pavimento o tipo de superficie (granular, TSD, carpeta asfáltica), carga acumulada de tránsito (ESALs), condiciones climáticas (precipitación, ciclos de congelamiento-deshielo, temperatura media), tipo de suelo y drenaje subrasante, frecuencia y calidad del mantenimiento ejecutado, y altura sobre el nivel del mar y pendiente longitudinal (en caminos de montaña).

En los CBVT, donde el tránsito puede ser bajo pero altamente agresivo (vehículos de carga sobredimensionados, transporte agrícola), la interacción entre calidad constructiva, clima y carga puntual es determinante en la evolución del deterioro.

Para anticipar y gestionar estos deterioros, se emplean modelos matemáticos de predicción que simulan el comportamiento de la infraestructura en el tiempo y permiten estimar necesidades futuras de mantenimiento o rehabilitación. No obstante, para que estos modelos generen resultados representativos y confiables, es fundamental realizar un proceso riguroso de calibración local, que considere las particularidades tipológicas de los caminos rurales, las características geográficas y climáticas del entorno, entre otros aspectos. Sólo con esta calibración contextualizada es posible obtener proyecciones válidas del ciclo de vida del camino, diseñar estrategias costo-efectivas y sustentar con solidez técnica las decisiones de inversión y conservación.

Los modelos de deterioro se integran usualmente en herramientas de gestión como los que siguen:

- HDM-4, que incluye modelos calibrados para evolución del IRI, fallas estructurales, costos de operación vehicular y beneficios sociales.
- dTIMS (Deighton Total Infrastructure Management System) o PAVER (Pavement Maintenance Management System), que permiten simular el desempeño de redes y analizar intervenciones a nivel de red o proyecto.

- ICARO, una herramienta más accesible para CBVT, que integra lógica de escenarios basada en información real de campo y procesos multicriterio para la selección de alternativas.

Según las referencias internacionales, es necesario basar las decisiones de inversión y conservación en proyecciones realistas del comportamiento futuro de los activos. Esto implica medir su estado actual y anticipar su evolución para minimizar el costo del ciclo de vida (LCC) mediante mantenimiento oportuno, aumentar la resiliencia de la red ante fenómenos extremos o interrupciones por fallas estructurales, priorizar intervenciones con criterios técnicos, económicos y sociales optimizando el uso de presupuestos limitados, y justificar financieramente ante autoridades o cooperantes la necesidad de intervención temprana o preventiva.

En un SGAV moderno y eficiente, el análisis de riesgos constituye un pilar transversal e ineludible para la toma de decisiones informadas y la planificación estratégica proactiva. Este análisis permite identificar, evaluar y mitigar amenazas potenciales que puedan afectar la funcionalidad, durabilidad, seguridad o disponibilidad de los activos viales, especialmente en entornos de alta vulnerabilidad como las redes rurales de CBVT.

La norma ISO 31000 (Gestión del Riesgo) establece principios, marcos de trabajo y procesos para integrar el análisis de riesgos dentro de los sistemas de gestión organizacional. Al aplicarse en el contexto vial —en conjunto con la familia ISO 55000—, permite a los responsables de la infraestructura anticipar y reducir la probabilidad de fallas, proteger la inversión pública y garantizar la conectividad esencial para los territorios más aislados.

El análisis de riesgos en CBVT debe considerar, como mínimo, las siguientes categorías de amenaza:

- Fallas estructurales por envejecimiento, mala calidad constructiva, diseño inadecuado o falta de mantenimiento.
- Pérdida de conectividad por colapso de puentes, alcantarillas o deslizamientos de taludes.
- Eventos climáticos extremos, como lluvias torrenciales, huaicos, flujos de detritos, inundaciones, sequías intensas (que agrietan subrasantes), o procesos de congelamiento-deshielo.
- Amenazas geotécnicas: deslizamientos, socavación de estructuras, erosión progresiva.
- Factores antrópicos: sobrecarga vehicular, tránsito de maquinaria pesada, actividades agrícolas o mineras no controladas.
- Restricciones presupuestarias y administrativas, que impiden la intervención oportuna y prolongan condiciones deficientes.

Estas amenazas pueden actuar de forma aislada o combinada, generando impactos acumulativos que afectan de manera desproporcionada a las poblaciones rurales más vulnerables.

Para sistematizar la gestión del riesgo, pueden aplicarse metodologías adaptadas a distintos niveles institucionales y capacidades técnicas:

- **Matriz de criticidad.** Permite cruzar la probabilidad de ocurrencia de un evento con su impacto estimado. Se utiliza para jerarquizar riesgos y definir niveles de atención prioritaria. Es especialmente útil para redes rurales donde se deben tomar decisiones con información limitada.
- **Failure Modes and Effects Analysis (FMEA).** Metodología estructurada que identifica modos de falla, sus causas y consecuencias, y permite asignar un número de prioridad de riesgo (RPN) para cada componente o tramo de la red. Se aplica en contextos donde existen inventarios estructurados y se requiere una priorización técnica rigurosa.
- **Métodos multicriterio (MCA).** Integran variables técnicas, sociales, económicas y ambientales, ponderadas según objetivos estratégicos. Son recomendados por PIARC y han sido aplicados en América Latina para seleccionar tramos críticos, intervenciones prioritarias o tecnologías de pavimentación adecuadas.
- **Análisis geoespacial de vulnerabilidad.** El uso de Sistemas de Información Geográfica (GIS) permite superponer capas de información territorial (altitud, precipitación, suelos, zonas de amenaza natural, presencia de servicios públicos), cruzándolas con la red vial para identificar tramos de alta exposición al riesgo climático o geotécnico.
- **Sistemas de alerta temprana y monitoreo remoto.** En contextos estratégicos, pueden instalarse sensores (humedad, nivel de agua, inclinación de taludes, vibración estructural) conectados a sistemas de alerta.

Los resultados del análisis de riesgo deben traducirse en:

- **Planes de mitigación:** obras menores, mantenimiento preventivo, mejoras de drenaje, señalización de zonas peligrosas.
- **Planes de emergencia:** rutas alternas, comunicación con comunidades, gestión logística ante interrupciones.
- **Priorización presupuestaria:** redirección de recursos hacia activos críticos o más expuestos.
- **Monitoreo permanente:** actualización periódica del perfil de riesgo, con alertas tempranas.

En entornos rurales con alta dispersión geográfica, escasos recursos y alta dependencia de la red vial para el acceso a servicios básicos, el análisis de riesgo deja de ser una práctica técnica opcional y se convierte en una condición imprescindible para la sostenibilidad operativa y social de los CBVT.

Con base en el análisis de condición, el diagnóstico técnico, el perfil de riesgo y las proyecciones de deterioro, el siguiente paso clave en el SGAV es la selección, programación y ejecución de las acciones más apropiadas para cada activo vial. Este proceso es esencial para garantizar la eficacia técnica, la sostenibilidad financiera y el retorno social de las inversiones en infraestructura, especialmente en redes rurales de bajo volumen, donde los recursos son escasos y las fallas pueden generar impactos significativos en comunidades vulnerables.

Las acciones de intervención vial pueden agruparse en cuatro categorías principales, cada una con un propósito distinto dentro del ciclo de vida del activo:

- **Mantenimiento rutinario.** Se refiere a intervenciones frecuentes y de bajo costo, cuya finalidad es preservar las condiciones operativas del camino y prevenir el avance del deterioro. En CBVT, incluye actividades como limpieza de cunetas y alcantarillas, desbroce y control de vegetación, reposición puntual de material en afirmados, reparación menor de baches, fisuras y grietas, y mantenimiento de señalización y elementos de seguridad. Este tipo de mantenimiento puede ser ejecutado incluso por microempresas locales, comunidades organizadas o promotores viales rurales, fortaleciendo la apropiación local y la empleabilidad.
- **Conservación periódica.** Incluye intervenciones planificadas, generalmente cada 2 a 5 años, que buscan restaurar el nivel de servicio y extender la vida útil del activo antes de que requiera una rehabilitación mayor. Puede incluir el reconformado de plataforma con compactación, la reposición de carpeta granular, los tratamientos superficiales (doble riego, cape seal, microaglomerado) y el mantenimiento preventivo de estructuras de drenaje. Este nivel de intervención requiere planificación técnica, recursos logísticos y en muchos casos contratación externa.
- **Rehabilitación estructural.** Corresponde a intervenciones de mayor magnitud y costo, ejecutadas cuando el deterioro ha alcanzado niveles severos que comprometen la estructura del camino. Incluye la estabilización de subrasantes, la reconstrucción de capas estructurales, sustitución de base o subbase, y la rehabilitación de puentes o estructuras con niveles de deterioro avanzado. Deben diseñarse con base en estudios detallados y análisis de costo del ciclo de vida (LCC), y priorizarse en tramos estratégicos o de alta criticidad.
- **Reemplazo o reconstrucción total.** Se aplica cuando el activo ha superado su vida útil o ha sufrido daños irreversibles. En CBVT, puede implicar rediseñar secciones completas, modificar trazados o construir nuevas estructuras. Es la alternativa más costosa y debe reservarse para casos justificados por su alto valor social o funcional.

La programación efectiva de intervenciones debe considerar múltiples variables:

- **Costo-efectividad.** Priorizar aquellas acciones que, con menor inversión, produzcan mayor extensión de vida útil o mejor nivel de servicio. Se recomienda aplicar análisis de costo-beneficio o de retorno social de la inversión.
- **Nivel de servicio y criticidad del activo.** Priorizar vías con alta dependencia social, acceso a servicios esenciales (salud, educación, alimentos) o valor productivo estratégico.
- **Urgencia o riesgo asociado.** Intervenir prioritariamente en tramos cuya falla pueda producir aislamiento, pérdida de conectividad o accidentes viales.
- **Condiciones climáticas y estacionales.** Planificar según el calendario agroclimático de la región. En zonas de montaña o selva alta, las obras deben ejecutarse en época seca para asegurar calidad y continuidad operativa.
- **Disponibilidad presupuestaria y capacidad institucional.** Ajustar la programación a los ciclos de inversión pública (por ejemplo, los sistemas de programación multianual del MEF en Perú) y a la capacidad operativa del nivel de gobierno (local, regional, nacional).

En suma, una programación bien estructurada permite transformar el SGAV en una herramienta estratégica de gestión territorial, superando la lógica reactiva tradicional y promoviendo una infraestructura vial rural resiliente, equitativa y eficiente.

Un SGAV eficaz no es un sistema estático, sino un marco dinámico que debe evolucionar constantemente frente a los cambios técnicos, climáticos, sociales, financieros e institucionales. Su sostenibilidad y relevancia en el tiempo dependen de su capacidad para adaptarse, corregir desviaciones, capitalizar aprendizajes y mejorar procesos, lo cual requiere establecer mecanismos formales y operativos de mejora continua.

Este principio está recogido de manera explícita en la norma ISO 55001, que propone un ciclo de gestión basado en el enfoque Planificar–Hacer–Verificar–Actuar (PHVA). Según esta norma, toda organización responsable de activos físicos debe incorporar procesos sistemáticos que permitan:

- Revisar periódicamente el cumplimiento de metas operativas y estratégicas.
- Identificar desviaciones respecto a lo planificado.
- Evaluar la eficacia de las intervenciones y decisiones adoptadas.
- Analizar los resultados obtenidos con indicadores técnicos, financieros y sociales.
- Extraer y documentar lecciones aprendidas de casos exitosos o fallidos.

- Ajustar procedimientos, políticas, normas o herramientas en función de estos hallazgos.

Este enfoque es particularmente importante en redes rurales o de bajo volumen, donde las condiciones operativas cambian con frecuencia (clima, tipo de tráfico, intervención comunitaria, accesibilidad), y donde muchas veces los equipos de gestión trabajan con información incompleta o recursos limitados, lo que obliga a un sistema que aprenda constantemente de sí mismo.

Los componentes clave de la mejora continua en el SGAV se pueden resumir a continuación:

- **Revisión sistemática de datos e indicadores.** Los inventarios, evaluaciones de condición, proyecciones de deterioro y análisis de riesgo deben ser revisados de forma periódica. Se recomienda establecer ciclos anuales o bianuales para actualizar la condición de la red (IRI, deterioros, drenajes, puentes), el cumplimiento del nivel de servicio objetivo, el estado de ejecución de intervenciones planificadas, los indicadores de desempeño técnico y financiero (KPI), y los impactos sociales y económicos en la población usuaria.
- **Auditorías técnicas y de gestión.** La normatividad recomienda que los SGAV incluyan auditorías internas o externas para evaluar no sólo los resultados operativos, sino también la calidad de los procesos de planificación, seguimiento y ejecución. Estas auditorías deben considerar la coherencia entre inventarios y planes, la adecuación de modelos de deterioro y criterios de priorización, la transparencia en la asignación de recursos, y la documentación de decisiones y trazabilidad de la información.
- **Talleres de retroalimentación y participación.** En el contexto de CBVT, donde los usuarios son comunidades rurales dispersas, agricultores, escolares, trabajadores de salud y transporte informal, resulta fundamental establecer espacios de consulta y retroalimentación.
- **Gestión del conocimiento y capitalización de experiencias.** La mejora continua también implica capturar y sistematizar aprendizajes institucionales y territoriales. Esto incluye estudios de caso de intervenciones exitosas o fallidas, protocolos de respuesta ante emergencias climáticas, buenas prácticas en planificación, diseño, conservación o participación comunitaria, y revisión y actualización de normas técnicas, manuales y especificaciones locales.
- **Actualización de herramientas tecnológicas.** Dado el avance continuo de las tecnologías de gestión vial, la mejora continua también debe considerar la revisión periódica de los sistemas informáticos, plataformas SIG, modelos predictivos y soluciones digitales implementadas. Esta actualización debe garantizar que exista una compatibilidad con nuevas fuentes de datos (drones, sensores, imágenes satelitales); interoperabilidad entre sistemas locales y nacionales; y seguridad, accesibilidad y usabilidad para los actores técnicos.

- **Adaptación a nuevos escenarios y resiliencia institucional.** Finalmente, la mejora continua permite que el SGAV se adapte a nuevos desafíos como cambios normativos o institucionales (descentralización, reformas sectoriales), variaciones presupuestarias (reducción o aumento de fondos), emergencias climáticas o eventos extremos (El Niño, inundaciones, deslizamientos), incorporación de enfoques transversales (sostenibilidad, equidad, digitalización), y nuevas metodologías (inteligencia artificial, *machine learning*, planificación basada en datos).

En este sentido, un SGAV bien diseñado no sólo contribuye al mantenimiento físico de la infraestructura, sino que se convierte en un instrumento de gobernanza técnica, territorial y social, que aprende, evoluciona y mejora de manera continua.

Tecnologías emergentes y digitalización para la gestión inteligente de caminos de bajo volumen de tránsito

La incorporación de tecnologías emergentes y la digitalización de procesos representan un cambio de paradigma en la gestión de activos viales, especialmente en el contexto de los CBVT. Estas soluciones ofrecen la posibilidad de superar barreras estructurales históricas como la falta de información actualizada, la dispersión territorial, la escasa conectividad, y la limitada capacidad institucional y presupuestaria.

Hoy en día, la convergencia de tecnologías como la IA, la visión computacional, el Internet de las cosas (IoT), el análisis masivo de datos, los GIS y las plataformas colaborativas en la nube permiten crear modelos de gestión predictiva, automatizada y descentralizada, más adecuados para las condiciones cambiantes, desafiantes y a menudo inestables de las redes rurales en países como Perú. Esta transformación digital mejora la eficiencia de las operaciones y fortalece la resiliencia vial, la transparencia institucional y la sostenibilidad económica y social de la inversión pública.

A continuación, se exponen las principales innovaciones tecnológicas que serán aplicables a los CBVT:

- **Procesamiento automatizado de imágenes.** El uso de cámaras de video (instaladas en vehículos, motocicletas, drones o incluso teléfonos móviles) combinado con algoritmos de visión computacional permite detectar deterioros superficiales como grietas, baches, desprendimientos o fisuras sin necesidad de intervención humana directa. Con técnicas de *machine learning*, estos sistemas pueden clasificar los daños por tipo, severidad y extensión. Herramientas como RoadBotics, PavementAI, o desarrollos locales con redes neuronales (CNN) se han utilizado en contextos rurales, y son fácilmente replicables en CBVT peruanos mediante alianzas con universidades o centros tecnológicos.

- **Plataformas de gestión basadas en la nube.** Las soluciones digitales modernas utilizan plataformas interoperables que permiten almacenar inventarios georreferenciados, vincular información de campo en tiempo real, visualizar mapas de deterioro, criticidad y riesgo, y automatizar flujos de trabajo para programación de intervenciones.
- **Aplicaciones de inteligencia artificial en planificación vial.** La IA permite ir más allá del monitoreo, aportando herramientas predictivas para la toma de decisiones estratégicas: modelos de regresión multivariable para predecir evolución distintos tipos de parámetros tanto estructurales como funcionales; redes neuronales artificiales entrenadas con datos locales para estimar el ciclo de vida de diferentes tipos de caminos (granulares, estabilizados, asfaltados); y análisis multicriterio automatizado para priorizar inversiones según variables técnicas, sociales y económicas.
- **Uso de *blockchain* para trazabilidad, contratación y gobernanza vial.** Esta tecnología, ampliamente reconocida en los sectores financiero y logístico por su capacidad para garantizar integridad, transparencia y descentralización de la información, también presenta un potencial disruptivo para la gestión de activos viales, especialmente en redes complejas y fragmentadas como las de los CBVT. Un sistema *blockchain* almacena datos en bloques encadenados y distribuidos entre múltiples nodos, lo que impide su alteración sin dejar rastro. Esta característica puede ser utilizada para registrar de manera inmutable y verificable las intervenciones viales, los contratos ejecutados y la evolución de los activos, facilitando así la auditoría, la transparencia y la confianza entre múltiples actores institucionales. Entre sus principales aplicaciones en el contexto de los CBVT se puede utilizar para trazabilidad y verificación de intervenciones. La *blockchain* puede emplearse para registrar actividades de mantenimiento, rehabilitación o monitoreo con datos georreferenciados y evidencia digital (fotos, sensores, formularios) o implementar contratos inteligentes para mantenimiento por desempeño que operan con algoritmos autoejecutables que pueden activarse automáticamente al cumplirse ciertos parámetros.

La incorporación progresiva de tecnologías disruptivas, emergentes y enfoques digitales en la gestión de CBVT no debe considerarse una opción futurista, sino una estrategia clave para asegurar la sostenibilidad operativa, financiera y social de la red vial rural. En un contexto de cambio climático, creciente presión sobre los presupuestos públicos y transformación digital acelerada, los SGAV modernos requieren herramientas que permitan tomar decisiones basadas en datos, anticipar fallas, reducir costos de ciclo de vida y garantizar la transparencia de la inversión pública. Mantenerse al día frente a estas tecnologías –como la inteligencia artificial, la digitalización en la nube o incluso la *blockchain*– no sólo mejora la eficiencia técnica, sino que fortalece la resiliencia institucional y el impacto social de los programas viales. En consecuencia, se recomienda que los tomadores de decisiones, técnicos locales y entidades rectoras incorporen una agenda tecnológica activa y progresiva, con espacios de capacitación continua, cooperación interinstitucional y validación piloto de soluciones innovadoras adaptadas al entorno rural peruano.

CAPÍTULO

8



Modelos de financiamiento y participación del sector privado

Guía técnica de soluciones e innovaciones tecnológicas
para la mejora de caminos de bajo volumen de tráfico en Perú

CAPÍTULO 8

Modelos de financiamiento y participación del sector privado

En este capítulo se analiza los modelos de financiamiento y la participación del sector privado en la infraestructura vial rural, destacando alternativas viables para garantizar la sostenibilidad y expansión de los CBVT. Se inicia con un estudio sobre las fuentes de financiamiento para infraestructura vial rural, abordando mecanismos de inversión pública, cooperación internacional y programas de desarrollo sostenible. Posteriormente, se presentan estrategias de financiamiento sostenible, incluyendo modelos innovadores de gestión presupuestaria y el uso de incentivos para optimizar el mantenimiento de los CBVT sin comprometer los recursos fiscales. Se explora el rol del sector privado en la infraestructura rural, analizando esquemas de Asociaciones Público-Privadas (APP), Obras por Impuestos (OXI), contratos de desempeño y mecanismos de inversión privada que permitan mejorar la eficiencia en la ejecución y conservación de los caminos rurales. Por último, se abordan los esquemas de gestión colaborativa con comunidades locales, promoviendo modelos participativos en los cuales la población se involucre en el mantenimiento de la red vial rural, generando empleo, fortaleciendo la apropiación territorial y garantizando una mayor sostenibilidad de los CBVT a largo plazo. Se incorporan detalles sobre experiencias y casos de éxito conocidos en el Perú que podrían replicarse.

Fuentes de financiamiento para infraestructura vial rural

La expansión, rehabilitación y conservación de los CBVT generalmente enfrenta limitaciones estructurales como la insuficiente disponibilidad y sostenibilidad de recursos financieros. Esta situación se agrava en territorios rurales donde las brechas de acceso, conectividad y capacidades institucionales son más pronunciadas. Esta restricción no sólo compromete la calidad y continuidad de las intervenciones, sino que profundiza las condiciones de desigualdad territorial y limita el potencial productivo, educativo y sanitario de millones de habitantes que dependen de esta red vial para su desarrollo cotidiano.

A pesar de que los CBVT representan más del 70% de las redes viales de Perú y son responsables de articular las zonas agrícolas, ganaderas y forestales con los mercados regionales y nacionales, su financiamiento ha sido históricamente fragmentado, reactivo y orientado a intervenciones puntuales, sin una estrategia de largo plazo que garantice su operación continua y resiliente. El uso predominante de recursos públicos bajo esquemas tradicionales ha demostrado ser insuficiente frente a la magnitud del

reto, especialmente en un escenario de restricciones fiscales, vulnerabilidad climática creciente y aumento de la demanda social por infraestructura segura y funcional.

En este contexto, resulta relevante avanzar hacia un modelo de financiamiento diversificado, sostenible y territorialmente adaptado, que articule fuentes públicas, cooperación internacional, mecanismos privados e instrumentos financieros innovadores. Este enfoque permitiría ampliar la cobertura de inversión, así como mejorar la eficiencia del gasto, incentivar la participación de nuevos actores y fortalecer la gobernanza local en la planificación y conservación de la red vial rural. Asimismo, es clave que este modelo integre criterios de sostenibilidad ambiental, inclusión social y resiliencia, alineándose con los compromisos nacionales e internacionales en materia de desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático.

Las principales fuentes de financiamiento se detallan a continuación.

Fuentes públicas:

- **Inversión pública tradicional.** Incluye inversión nacional, subnacional y transferencias fiscales.
- **Cooperación internacional y financiamiento multilateral.** Aunque proviene de entidades multilaterales, se canaliza a través del Estado.
- **Fondos climáticos y fondos verdes.** Se gestionan a través de agencias estatales o multilaterales.
- **Programas multisectoriales de desarrollo.** Financiados por sectores del gobierno (agricultura, salud, educación, etc.).

Fuentes mixtas (público privadas):

- **Asociaciones Público–Privadas (APP).** Participación privada con respaldo y supervisión del Estado.
- **Financiamiento compartido y comunitario.** Incluye aportes de comunidades, municipios y otros actores territoriales.

Fuentes privadas:

- **Obras por Impuestos (OXI).**

Estrategias de financiamiento sostenible

La sostenibilidad financiera en la infraestructura vial rural, particularmente en los CBVT, no sólo depende de identificar fuentes de financiamiento, sino de establecer estrategias estructurales que garanticen continuidad, eficiencia y resiliencia del flujo de recursos a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura. Estas estrategias deben estar alineadas con la realidad fiscal de los países, las capacidades institucionales de los gobiernos subnacionales y las condiciones territoriales específicas. A continuación, se presentan las principales estrategias recomendadas para consolidar un modelo de financiamiento sostenible en caminos rurales.

Planificación multianual del financiamiento

Una de las debilidades estructurales más frecuentes en la gestión de los CBVT es la falta de planificación presupuestaria con enfoque multianual, lo que impide establecer un flujo constante de recursos para la conservación, mejora y expansión de la red vial rural.

En la práctica, los presupuestos suelen asignarse de forma anual bajo criterios políticos o de oportunidad, lo que da lugar a proyectos fragmentados, sin continuidad técnica ni visión de largo plazo. Esta situación se traduce en inversiones ineficientes, sobrecostos acumulativos por falta de mantenimiento oportuno y una reducción drástica en la vida útil de las obras ejecutadas.

Para revertir este problema, es esencial que los gobiernos nacionales y subnacionales desarrollen e implementen planes viales multianuales, articulados con los planes de desarrollo territorial y los marcos presupuestarios de mediano plazo. Estos planes deben incluir:

- Presupuestos referenciales vinculados a metas físicas concretas, como la rehabilitación de kilómetros de vía, mejora de accesos a servicios básicos o integración de corredores productivos.
- Integración obligatoria con los sistemas de programación y evaluación de la inversión pública, como es el caso de Invierte.pe en Perú o el Sistema Nacional de Inversiones Públicas (SNIP) en países como Paraguay, Honduras y El Salvador.
- Priorización basada en criterios técnicos y territoriales, incluyendo el nivel de criticidad funcional del camino, la demanda potencial, el impacto social esperado y el costo del ciclo de vida.

Esta estrategia permite, además de dar coherencia técnica a la inversión vial, reducir la dependencia de decisiones presupuestarias coyunturales, mejorar la coordinación entre niveles de gobierno, y generar condiciones más favorables para la negociación con cooperantes, bancos de desarrollo y posibles actores privados interesados en participar bajo esquemas de financiamiento mixto.

Adicionalmente, el uso de matrices multianuales de priorización facilita la evaluación periódica de los avances; el reajuste de metas en función de nuevas condiciones climáticas, económicas o sociales; y el diseño de portafolios de proyectos estructurados, condición clave para atraer financiamiento internacional o acceder a fondos climáticos.

Asignación de fondos condicionados por desempeño

Una herramienta clave para mejorar la eficiencia del gasto público y asegurar la sostenibilidad financiera en la infraestructura vial rural es la creación de mecanismos de financiamiento condicionado a resultados. A diferencia del enfoque tradicional –basado en transferencias o asignaciones automáticas por volumen de obras o presupuesto histórico–, este modelo recompensa la calidad de la gestión y el cumplimiento de metas técnicas verificables, promoviendo una cultura de mejora continua, transparencia y rendición de cuentas. Entre los instrumentos más eficaces en esta línea se destacan:

- **Fondos de incentivo a gobiernos subnacionales**, en los cuales la asignación de recursos está condicionada al cumplimiento de indicadores como actualización oportuna del inventario vial; ejecución de mantenimiento rutinario conforme a cronogramas; disponibilidad de planes viales multianuales actualizados; e implementación de sistemas de monitoreo de condición. Estos fondos permiten fomentar la institucionalización de buenas prácticas, incluso en contextos con baja capacidad técnica inicial, mediante el desarrollo progresivo de competencias.
- **Contratos de conservación por niveles de servicio (Performance-Based Maintenance Contracts–PBMC)**, en los que el contratista recibe pagos periódicos no por actividades específicas ejecutadas, sino por mantener la vía en condiciones previamente definidas y verificadas mediante indicadores técnicos. En CBVT, estos contratos pueden adaptarse para abarcar tramos estratégicos con alta demanda estacional (como zonas agrícolas o escolares) o donde los gobiernos locales carecen de capacidad operativa para conservar las vías por medios propios. La estructura de los PBMC suele incluir un período de mantenimiento inicial, un monitoreo periódico y cláusulas de penalidad o bonificación en función del cumplimiento de los estándares.

Un aspecto crítico para el éxito de estos modelos contractuales es que trasladan al contratista una parte significativa del riesgo técnico, especialmente en lo relacionado con la ingeniería del diseño y la solución constructiva aplicada. En este sentido, el modelo exige que el contratista proponga las soluciones más adecuadas para garantizar el desempeño del camino durante todo el período contractual, fomentando la eficiencia técnica y la innovación.

Esta lógica adquiere particular importancia en el contexto peruano, donde muchos proyectos de CBVT –como los implementados bajo el programa PROREGIÓN– se han basado en Perfiles Básicos de Ingeniería que, para fines de contratación por desempeño, deben asumirse como documentos referenciales, y no como diseños cerrados. Esta

flexibilidad permite al contratista adaptar las soluciones a las condiciones reales del terreno, el tránsito, el clima y los materiales disponibles, asegurando resultados sostenibles y eficaces.

Este enfoque ha sido implementado exitosamente en países como Chile y Colombia. En el caso peruano, si bien el modelo de conservación por desempeño aún no está plenamente institucionalizado en CBVT, experiencias vinculadas a PROREGIÓN y programas regionales han demostrado su viabilidad, especialmente en regiones con condiciones climáticas adversas o con necesidades de transitabilidad permanente para el acceso a servicios básicos.

Además, estos mecanismos permiten atraer financiamiento externo o apoyo de cooperación internacional, ya que aportan previsibilidad, medición objetiva de resultados y estructuras de riesgo compartido, elementos clave para la sostenibilidad técnica y financiera de la red vial rural.

Gestión programática de la inversión en CBVT

Frente a la dispersión de intervenciones de pequeña escala, muchas veces desconectadas entre sí y gestionadas como proyectos aislados, se vuelve imprescindible transitar hacia un enfoque programático y territorialmente articulado en el financiamiento y ejecución de CBVT. Esta fragmentación histórica ha dificultado el aprovechamiento de sinergias, ha incrementado los costos unitarios por falta de economías de escala, y ha limitado la posibilidad de implementar soluciones técnicas estandarizadas y sostenibles.

El enfoque programático permite estructurar el financiamiento y la ejecución de los caminos rurales bajo estrategias integrales, multianuales y escalables, en las que las intervenciones se agrupan y priorizan de forma coherente a nivel territorial. Este tipo de enfoque no sólo es más eficiente desde el punto de vista financiero, sino que también contribuye a mejorar la gestión técnica, institucional y ambiental del proceso de inversión. Las principales ventajas de este modelo incluyen:

- **Aprovechamiento de economías de escala:** al agrupar varios tramos o corredores en un solo paquete de inversión, es posible reducir costos en estudios, supervisión, adquisición de materiales, movilización de maquinaria y personal técnico. Esto permite obtener mayor cobertura con igual o menor presupuesto.
- **Acceso más eficiente a financiamiento externo:** los organismos multilaterales y agencias de cooperación internacional tienden a financiar programas estructurados con componentes definidos y mecanismos de control. Los paquetes integrales permiten acceder a líneas de crédito, donaciones o cofinanciamiento con mayor facilidad, debido a su coherencia técnica y su impacto agregado.
- **Facilidad para implementar soluciones técnicas homogéneas:** la agrupación de tramos con características similares (topografía, clima, tipo de suelo, tránsito) permite

diseñar soluciones modulares replicables, facilitando los procesos de contratación y construcción, así como la gestión del mantenimiento.

- **Mejor planificación y articulación territorial:** al organizar las inversiones por corredores productivos, cuencas, territorios rurales o distritos, se maximiza el impacto social y económico de las intervenciones, alineándolas con los objetivos de desarrollo local, acceso a mercados, salud, educación y servicios básicos.
- **Fortalecimiento institucional:** la estructuración de programas obliga a los gobiernos locales, regionales y nacionales a coordinarse y establecer roles más claros, lo que promueve el fortalecimiento de capacidades y la creación de unidades técnicas especializadas en la gestión de CBVT.

Este enfoque ha sido clave en programas exitosos como PROREGIÓN, que estructuró paquetes de caminos rurales integrados con criterios técnicos y sociales, permitiendo una intervención más estratégica en regiones de alta vulnerabilidad. Al intervenir corredores completos en lugar de tramos aislados, se logró potenciar el impacto territorial, mejorar la conectividad funcional y optimizar la asignación de recursos.

No obstante, la experiencia también ha evidenciado que la viabilidad y efectividad del modelo dependen en gran medida de la capacidad técnica y financiera de las empresas contratistas, especialmente en contextos complejos y con condiciones operativas desafiantes. En varios casos, se identificaron demoras significativas en la etapa de mejoramiento, asociadas a contratistas con limitaciones para movilizar maquinaria, personal calificado o financiamiento oportuno.

Para mitigar estos riesgos y asegurar una ejecución más ágil, es recomendable ajustar el alcance físico de los proyectos, adaptando el tamaño de los paquetes viales a las capacidades reales del mercado local. Esta medida permite mantener el enfoque sistémico, pero reduciendo la exposición a riesgos contractuales por incumplimiento o retraso.

En resumen, el modelo programático supera las limitaciones del enfoque fragmentado tradicional, promoviendo una visión más sistémica y estratégica de la infraestructura vial rural, y facilitando su sostenibilidad técnica, financiera y social a largo plazo. Sin embargo, su aplicación efectiva requiere una evaluación cuidadosa de las capacidades del mercado y una planificación flexible, que permita adaptarse a los desafíos operativos propios de los contextos rurales.

Incorporación de criterios de costo del ciclo de vida (LCC)

Una de las estrategias clave para alcanzar un financiamiento que sea genuinamente sostenible de la infraestructura vial rural es la incorporación del enfoque de Costo del Ciclo de Vida (*Life-Cycle Costing*, LCC) en todas las etapas del proceso de inversión.

Este enfoque supera la visión cortoplacista que se enfoca únicamente en los costos iniciales de construcción, y en su lugar, considera todos los costos asociados al activo vial a lo largo de su vida útil, incluyendo mantenimiento rutinario, rehabilitaciones periódicas, monitoreo, gestión ambiental, y disposición final en caso de reemplazo.

En el caso de los CBVT, esta práctica es particularmente crítica, dado que las decisiones técnicas mal fundamentadas –como el uso de materiales inadecuados, el diseño geométrico deficiente o la falta de sistemas de drenaje– pueden derivar en degradación acelerada, necesidad de intervenciones prematuras y sobrecostos acumulativos que comprometen la sostenibilidad del sistema. Por el contrario, una visión integral que evalúe alternativas desde la perspectiva del LCC permite seleccionar aquellas soluciones más eficientes a largo plazo, incluso si su costo inicial es ligeramente superior.

Este enfoque implica que los estudios de preinversión y los términos de referencia para diseño y ejecución incorporen explícitamente criterios como:

- Comparación de soluciones técnicas mediante modelos LCC, considerando tasas de descuento, ciclos de mantenimiento y escenarios climáticos.
- Priorización de soluciones duraderas, resilientes y adaptadas al entorno geográfico, como estabilización de suelos, sistemas de drenaje resiliente, tratamientos superficiales reforzados o pavimentos con alta resistencia hídrica en zonas de lluvia intensa.
- Inclusión de costos asociados a actividades de operación y mantenimiento, tales como limpieza de cunetas, reparación de taludes, reposición de señalización y remoción de deslizamientos.
- Incorporación de los costos de monitoreo de condición vial, utilizando tecnologías como inspección visual sistemática, sensores remotos, drones o herramientas automatizadas de detección de deterioro.
- Cálculo del costo ambiental asociado a cada solución (emisiones, huella de carbono, alteración de ecosistemas) y su mitigación a través de bioingeniería o materiales reciclados.

Además, el enfoque LCC es clave para la priorización técnica de inversiones cuando los recursos son limitados, ya que permite identificar aquellos tramos donde una intervención temprana o preventiva puede evitar la necesidad de reconstrucción completa en el corto plazo. También es útil para evaluar modelos de contratación alternativos, como contratos integrados de diseño-construcción-mantenimiento o esquemas de conservación por desempeño.

Fortalecimiento institucional y gobernanza financiera

Finalmente, toda estrategia de financiamiento sostenible para CBVT requiere como condición habilitante una estructura institucional robusta, tanto a nivel nacional como subnacional. La capacidad técnica, administrativa, normativa y operativa de las entidades responsables de la infraestructura vial rural es, en muchos casos, el factor decisivo que determina si los recursos –sean públicos, privados o internacionales– se traducen efectivamente en resultados tangibles, duraderos y equitativos. Este fortalecimiento institucional debe abordarse de manera integral y progresiva, abarcando múltiples dimensiones:

- Capacitación continua y especializada de funcionarios y técnicos en temas clave como planificación financiera multianual, formulación de proyectos de inversión pública, evaluación socioeconómica, LCC, gestión de contratos por desempeño y administración de fondos externos. Estas capacidades deben ser fortalecidas en los niveles regionales, provinciales y distritales, adaptadas a su rol en la cadena de valor de la gestión vial.
- Mejora de los marcos normativos y procedimentales, incluyendo la estandarización de procesos para la priorización de intervenciones, la definición clara de responsabilidades entre niveles de gobierno, y la incorporación de incentivos para la eficiencia presupuestaria y la innovación técnica.
- Fomento de la transparencia y la rendición de cuentas, tanto ante los órganos de control como frente a la ciudadanía, mediante la publicación periódica de información presupuestal, avances físicos, resultados de mantenimiento y niveles de servicio. La transparencia no sólo fortalece la confianza institucional, sino que permite construir legitimidad social para programas de largo plazo.

Fondos verdes y climáticos

En el marco del financiamiento sostenible para infraestructura vial rural, los fondos verdes y climáticos representan una oportunidad estratégica para canalizar recursos hacia intervenciones que promuevan la resiliencia climática, la reducción de emisiones y la sostenibilidad territorial. Estos mecanismos, como el Fondo Verde para el Clima (GCF), el Fondo de Adaptación o las iniciativas financiadas por el Banco Mundial, CAF, BID y GEF, priorizan proyectos que integran criterios de mitigación y adaptación al cambio climático en el diseño, construcción y mantenimiento de la infraestructura.

Para que los proyectos de CBVT sean elegibles para este tipo de financiamiento, es crucial demostrar su contribución ambiental, tanto directa (por ejemplo, reducción de emisiones a través de tecnologías limpias) como indirecta (conectividad para zonas vulnerables, reducción de desplazamientos y huella de carbono).

En este contexto, resulta clave incorporar metodologías de certificación voluntaria como las ya descritas anteriormente:

- Greenroads, que evalúa aspectos como gestión ambiental de la obra, eficiencia en el uso de materiales, diseño para la resiliencia, gestión del agua y participación comunitaria.
- Envision, que permite valorar el desempeño ambiental, económico y social de proyectos de infraestructura, lo que es útil para justificar su valor en términos de sostenibilidad integral.
- CEEQUAL, enfoque europeo centrado en ingeniería civil sostenible.

Estas herramientas permiten estructurar proyectos con criterios verificables de sostenibilidad, facilitando la generación de indicadores ambientales y sociales que son exigidos por fondos internacionales. Además, promueven buenas prácticas de planificación y construcción sustentable.

En el caso peruano, pueden guiar el diseño de proyectos piloto para caminos rurales en territorios con alta exposición al cambio climático (erosión, deslizamientos, lluvias extremas), facilitando el acceso a financiamiento no reembolsable o créditos concesionales. La institucionalización progresiva de estos criterios en las fases de preinversión y diseño permitiría posicionar a los CBVT como una infraestructura climáticamente inteligente, maximizando su impacto territorial y su viabilidad financiera.

Participación del sector privado en infraestructura rural

La participación del sector privado en el desarrollo de infraestructura vial rural constituye una estrategia complementaria clave para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y cobertura de inversión en los CBVT. Si bien históricamente este tipo de infraestructura ha sido financiada y gestionada principalmente por el sector público, la creciente complejidad de los desafíos –presupuestos limitados, mayores estándares de calidad, riesgos climáticos y presión social por resultados sostenibles– exige nuevas formas de colaboración entre actores públicos, privados y comunitarios.

Dado lo anterior, existen varias formas en que el sector privado puede involucrarse en el desarrollo y conservación de caminos rurales, adaptadas a contextos de bajo tránsito y con experiencias en ALC.

Asociaciones Público-Privadas (APP)

Son mecanismos contractuales de mediano o largo plazo mediante los cuales un ente público transfiere al sector privado responsabilidades vinculadas al diseño,

financiamiento, construcción, operación y/o mantenimiento de infraestructura pública. El actor privado recibe una compensación, que puede ser mediante tarifas pagadas por los usuarios (peajes), pagos periódicos por disponibilidad del servicio, o subsidios del Estado.

En el contexto de los CBVT, los modelos convencionales de APP –como las concesiones viales con recuperación de inversión vía peajes– suelen resultar poco viables o atractivos para operadores privados debido a la baja demanda vehicular, la alta dispersión geográfica de los asentamientos rurales, los altos costos de transacción, y la dificultad para garantizar retornos directos sobre la inversión.

No obstante, existen esquemas adaptativos y más viables para ciertas realidades rurales, en particular los que se vinculan a corredores logísticos estratégicos. Estos corredores suelen articular zonas de producción agroexportadora (café, cacao, frutas, banano, palta, quinua), minería o forestal, con vías nacionales, centros de acopio, plantas de transformación y mercados internacionales.

En estos entornos, los caminos rurales –aunque de bajo volumen promedio– cumplen un rol fundamental como infraestructura de primer orden para acceder a cadenas logísticas de alto valor. Allí, las APP pueden orientarse a la conectividad productiva, en la que el incentivo del sector privado no necesariamente radica en la retribución por tarifa, sino en beneficios indirectos como la reducción de sus propios costos logísticos, al mejorar el acceso para el transporte de sus productos o insumos; la mayor eficiencia operativa, al contar con rutas más confiables para abastecimiento o distribución; y la mejora de su imagen institucional o responsabilidad social territorial, al contribuir con el desarrollo de las comunidades de su entorno (licenciamiento social).

Estos modelos de APP no exigen rentabilidad directa en términos de peaje, sino que deben estructurarse con incentivos contractuales flexibles y mecanismos mixtos de compensación. Además, requieren un mapeo previo de los corredores productivos, la caracterización del tránsito estratégico y una adecuada articulación con las políticas de desarrollo económico regional.

En conclusión, si bien no todos los CBVT son candidatos viables para APP, en zonas con actividad productiva organizada y con infraestructura vial articulada estos esquemas pueden complementar la inversión pública y garantizar mayor eficiencia en la conservación.

Obras por impuestos (OXI)

Este mecanismo es una herramienta innovadora de financiamiento público con participación privada, mediante el cual una empresa puede financiar y ejecutar directamente obras de infraestructura pública priorizadas por gobiernos subnacionales o entidades del gobierno nacional, obteniendo como beneficio una deducción equivalente del monto invertido en su Impuesto a la Renta. Esta modalidad ha sido reconocida por

su agilidad operativa, su capacidad de ejecución eficiente y su potencial para cerrar brechas de infraestructura en sectores donde la ejecución pública tradicional es limitada o ineficiente.

En el ámbito de los CBVT, las OXI representan una oportunidad estratégica para canalizar inversión privada hacia infraestructura crítica de conectividad rural, especialmente en zonas donde existen actividades económicas relevantes (minería, agroindustria, forestación) que requieren caminos funcionales durante todo el año; las comunidades locales enfrentan dificultades de acceso a servicios básicos; la falta de caminos adecuados agudiza la pobreza, la exclusión y la vulnerabilidad social; y las capacidades técnicas o logísticas de los gobiernos subnacionales son reducidas, lo que dificulta la formulación y ejecución efectiva de proyectos mediante mecanismos tradicionales.

Perú es un ejemplo importante de esta metodología con más de 470 proyectos ejecutados, según información proporcionada por PROINVERSION. Una proporción significativa representa intervenciones en el ámbito rural, especialmente en las zonas de la Sierra.

En suma, el mecanismo de Obras por Impuestos brinda un puente entre el sector privado y la infraestructura pública rural, con alto potencial para reducir brechas de conectividad, promover corresponsabilidad empresarial y acelerar la mejora de la red vial en zonas postergadas. Su incorporación dentro de una estrategia nacional de desarrollo vial rural puede convertirse en un pilar para construir caminos más resilientes, inclusivos y sostenibles.

Como se puede apreciar, la incorporación del sector privado como socio estratégico en el desarrollo y conservación de los CBVT puede generar múltiples beneficios que van más allá del simple aporte financiero. Su participación, bajo marcos adecuados de colaboración, tiene el potencial de transformar la gestión de la infraestructura rural en términos de eficiencia, innovación, sostenibilidad y responsabilidad compartida. A continuación, se detallan algunos beneficios que son relevantes de la participación en el desarrollo de los CBVT:

- **Mejora de la eficiencia y calidad de ejecución.** El sector privado, al operar bajo lógicas de optimización de recursos, cumplimiento de cronogramas y control riguroso de costos, tiende a lograr una mayor eficiencia en la ejecución de obras viales, tanto en la etapa de construcción como en la de mantenimiento. Empresas con experiencia en ejecución de proyectos logísticos, industriales o de infraestructura pesada suelen aplicar estándares más estrictos de calidad, sistemas de aseguramiento continuo y protocolos técnicos que aseguran un mejor rendimiento estructural y funcional de las vías. Además, la exposición al escrutinio público y la necesidad de cumplir compromisos contractuales vinculados a resultados incentivan al sector privado a cumplir con altos niveles de exigencia técnica, lo cual puede traducirse en mayor durabilidad de las obras y menores necesidades de rehabilitación en el corto plazo.

- **Transferencia de conocimiento técnico y experiencia constructiva.** La participación privada permite trasladar capacidades, metodologías y tecnología al ámbito de la infraestructura rural, muchas veces carente de innovación por restricciones institucionales o presupuestarias. Esta transferencia de conocimiento puede expresarse en varias formas, como la aplicación de nuevas soluciones constructivas adaptadas al entorno geográfico, la capacitación del personal técnico local y de microempresas viales comunitarias, la introducción de sistemas de gestión digital (como BIM o monitoreo remoto), y la optimización logística en el transporte de materiales, secuencia de obras o coordinación con comunidades. Este proceso también favorece la generación de capacidades a nivel institucional cuando los gobiernos subnacionales interactúan con empresas que exigen altos estándares técnicos y administrativos.
- **Reducción de los tiempos de ejecución mediante procedimientos ágiles.** A diferencia del sector público, que está sujeto a procedimientos administrativos extensos (licitaciones, auditorías, controles concurrentes), el sector privado puede operar con procesos más ágiles y adaptativos, lo que se traduce en reducción de los plazos totales de ejecución. Esto es particularmente valioso en caminos rurales, donde la intervención oportuna –por ejemplo, antes de la temporada de lluvias– puede determinar el éxito o fracaso de la inversión.
- **Fomento de soluciones sostenibles y de largo plazo.** El sector privado, especialmente cuando su operación en el territorio es de carácter permanente (como en los sectores minero, agroexportador o forestal), tiene interés en que la infraestructura funcione de manera adecuada a largo plazo. Por ello, tiende a aplicar estándares constructivos más robustos y soluciones más duraderas, que reduzcan costos de operación, interrupciones logísticas y conflictos con la comunidad. Asimismo, muchas empresas aplican criterios de sostenibilidad, gestión ambiental y responsabilidad social, no sólo por convicción, sino también por exigencias del mercado, marcos regulatorios o licenciamiento ambiental.

Cada vez más, estas acciones se complementan con la búsqueda de certificaciones ambientales y de sostenibilidad bajo estándares reconocidos internacionalmente, como Greenroads y Envision. Estas certificaciones evalúan aspectos como el diseño ambientalmente consciente, la eficiencia energética en la construcción, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la seguridad vial, la equidad social y la gestión participativa. La adopción de estos estándares y certificaciones mejora la calidad y resiliencia de los CBVT, y refuerza la legitimidad social de las empresas participantes, al demostrar su compromiso con un desarrollo responsable y territorialmente alineado. Así, se consolida una infraestructura rural no sólo funcional y económica, sino también coherente con los principios del desarrollo sostenible y la agenda climática global.

Esquemas de gestión colaborativa con comunidades locales

La sostenibilidad y eficiencia de los CBVT dependen de factores técnicos o financieros, así como de la participación activa y organizada de las comunidades locales. En contextos rurales, especialmente en zonas geográficamente dispersas y con limitada capacidad institucional, los esquemas de gestión colaborativa se han consolidado como una estrategia efectiva para asegurar el mantenimiento rutinario, fortalecer la apropiación territorial y generar empleo local.

Este enfoque reconoce que las comunidades no son únicamente beneficiarias pasivas de la infraestructura vial, sino actores clave en su conservación, operación y vigilancia. Cuando se les incorpora desde la etapa de planificación y ejecución, se incrementa el sentido de pertenencia, se mejora la calidad del mantenimiento y se refuerzan los vínculos entre la infraestructura y el desarrollo local.

En varios países de América Latina se han implementado modelos exitosos de microempresas viales comunitarias, donde grupos organizados de pobladores se capacitan, formalizan y son contratados para realizar actividades de mantenimiento rutinario (limpieza de cunetas, desbroce, control de drenajes, reparaciones menores). Estas experiencias han demostrado que los esquemas colaborativos generan empleo directo e ingresos locales de forma estable, reducen costos de mantenimiento frente a modelos tradicionales, aumentan la frecuencia y oportunidad de intervención (lo que prolonga la vida útil de la vía) y fortalecen la cohesión social y la gestión comunal de recursos.

En Perú, uno de los modelos más representativos ha sido el de las microempresas de mantenimiento vial promovidas por Provías Descentralizado, que desde hace más de una década ha implementado esquemas de gestión local del mantenimiento rutinario en caminos rurales. A través de núcleos o asociaciones formalizadas, se contratan pobladores locales previamente capacitados para realizar actividades como limpieza de cunetas, desbroce, control de drenajes y reparaciones menores. Según datos de Provías Descentralizado de 2022, miles de microempresas viales han sido activadas en diversas regiones, cubriendo una red extensa de caminos vecinales, lo que evidencia la escala e impacto operativo de este modelo en la red vial rural del país.

En términos normativos, estos esquemas deben estar respaldados por marcos que permitan su implementación. Por ejemplo, en Perú existe la Ley Orgánica de Municipalidades (Ley N.º 27972), que faculta a los gobiernos locales a promover la participación ciudadana en la gestión de servicios y obras públicas. Las directivas internas de Provías Descentralizado institucionalizan la figura de las microempresas viales como parte del modelo de conservación.

Para garantizar su sostenibilidad, estos esquemas deben contar con asistencia técnica permanente, protocolos estandarizados, supervisión periódica y mecanismos de pago oportuno. Además, es recomendable que se articulen con las municipalidades distritales

o provinciales para asegurar su alineación con los planes viales y el sistema de gestión de activos.

A futuro, los esquemas colaborativos pueden fortalecerse mediante el uso de tecnologías sencillas –como aplicaciones móviles para reportes comunitarios o sistemas de georreferenciación– y vinculándose a estrategias de conservación por desempeño, donde las comunidades cumplan indicadores específicos a cambio de incentivos o pagos por resultados.

En síntesis, la gestión colaborativa no sólo es una alternativa técnica y económica viable para caminos rurales, sino una estrategia de desarrollo que integra a las comunidades en la gestión del territorio, promueve el empleo digno y refuerza el tejido social, contribuyendo a una infraestructura verdaderamente sostenible y territorialmente anclada.

CAPÍTULO

9



Conclusiones y recomendaciones

CAPÍTULO 9

Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se sintetizan los principales hallazgos de la guía, estableciendo un marco estratégico para la modernización y sostenibilidad de los CBVT en Perú. Se destacan las soluciones innovadoras propuestas a lo largo del documento y se proporcionan recomendaciones concretas para su implementación efectiva. Se resumen los principales hallazgos de la guía, resaltando las fortalezas y debilidades de la infraestructura vial rural en Perú, así como las oportunidades identificadas para su optimización. A continuación, se proponen estrategias para la implementación de soluciones innovadoras, abordando aspectos técnicos, tecnológicos y de gestión para mejorar el desempeño y la durabilidad de los CBVT. También se presentan propuestas de políticas públicas y mejoras normativas, con el objetivo de establecer marcos regulatorios más robustos que favorezcan el financiamiento, mantenimiento y desarrollo de infraestructura vial rural resiliente y eficiente. Para finalizar, se define un plan de acción para la modernización de los CBVT, proponiendo medidas concretas a corto, mediano y largo plazo, con la finalidad de transformar la red vial rural en una infraestructura más eficiente, sostenible e integrada con el desarrollo territorial del país. Se agregan recomendaciones respecto a la presentación de resultados positivos y las buenas prácticas obtenidas en el programa PROREGIÓN, a partir de la experiencia adquirida durante el seguimiento del programa y los logros y resultados que se puedan recabar de instancias nacionales como el PVD y PVN.

Principales hallazgos de la guía

La presente guía ha permitido realizar un análisis integral y multidimensional de los Caminos de Bajo Volumen de Tránsito (CBVT) en Perú, abordando aspectos técnicos, normativos, de gestión, sostenibilidad, financiamiento e innovación que reflejan tanto los desafíos estructurales como las oportunidades de modernización esta infraestructura esencial para el desarrollo territorial del país. A continuación, se resumen los principales hallazgos:

1. Durante el desarrollo de esta guía quedó establecida la relevancia estratégica de los CBVT en el desarrollo de roles claves respecto a la conectividad territorial, la inclusión social, el desarrollo productivo y la seguridad alimentaria.
2. Una gran parte de los CBVT presenta condiciones precarias de transitabilidad, debido a deficiencias en el diseño geométrico, la falta de drenaje efectivo y el uso de soluciones constructivas no adaptadas al clima o tránsito real. Esto evidencia la alta vulnerabilidad climática, en la que las precipitaciones intensas afectan severamente la funcionalidad vial.

3. Se ha identificado la urgencia de incorporar principios de sostenibilidad y economía circular en todas las etapas del ciclo de vida de los CBVT, desde el diseño hasta el mantenimiento. Las soluciones convencionales no siempre se ajustan a las condiciones del medio rural, por lo que es necesario promover técnicas adaptadas, como estabilizaciones con materiales locales, recubrimientos delgados de bajo impacto y drenaje sostenible.
4. Las tecnologías emergentes ofrecen oportunidades viables para mejorar la durabilidad y reducir el costo del mantenimiento en CBVT. La digitalización de la gestión vial rural, mediante herramientas GIS, sensores, drones, inteligencia artificial y modelos BIM, puede transformar la forma en que se diseñan, gestionan y monitorean estas vías. Se requiere fortalecer el uso de plataformas inteligentes de gestión de activos viales, con un enfoque basado en datos y ciclos de mantenimiento preventivo.
5. La gestión de los CBVT está distribuida entre diferentes niveles de gobierno (nacional, regional y local), lo que ha generado fragmentación en las responsabilidades, heterogeneidad técnica y débil articulación institucional. Se requiere avanzar hacia un sistema normativo más claro, adaptado a los CBVT, con metodologías de priorización, monitoreo y control de calidad adecuadas. El fortalecimiento de capacidades técnicas a nivel subnacional es una condición necesaria para mejorar la gestión integral de la red rural.
6. El financiamiento de los CBVT depende fuertemente de programas centralizados como PROREGIÓN, PVD y PVN. Se identifican oportunidades para diversificar las fuentes de financiamiento, incluyendo Asociaciones Público-Privadas, Obras por Impuestos y mecanismos de inversión sostenible. Se hace evidente la necesidad de estrategias de financiamiento multianual y sostenido, con enfoque en ciclo de vida, eficiencia y conservación.
7. Existen experiencias exitosas dentro del país (como algunos tramos del programa PROREGIÓN) y en la región latinoamericana que demuestran la viabilidad de implementar soluciones innovadoras adaptadas al medio rural. La sistematización de estas buenas prácticas y su replicabilidad a través de guías técnicas, capacitación y apoyo institucional puede acelerar la mejora de los CBVT en todo el territorio peruano.
8. Se requiere avanzar hacia un modelo de gestión vial rural centrado en el usuario, la resiliencia territorial y la sostenibilidad ambiental, alineado con las políticas de desarrollo rural, cambio climático y descentralización.

Estrategias para la implementación de soluciones innovadoras en Perú

La modernización y sostenibilidad de los CBVT en Perú requiere no sólo el conocimiento de soluciones técnicas apropiadas, sino también una estrategia clara para su implementación, que considere las condiciones institucionales, territoriales, sociales y presupuestarias del país. A continuación, se presentan un conjunto de estrategias estructuradas para facilitar la aplicación efectiva, sostenible y escalable de las soluciones innovadoras identificadas en esta guía.

- 1. Desarrollo de lineamientos técnicos nacionales adaptados a CBVT.** Una primera condición para la implementación efectiva de soluciones innovadoras es la existencia de documentos normativos claros y actualizados. Se recomienda elaborar o actualizar manuales técnicos específicos para CBVT, incluyendo capítulos sobre tecnologías de estabilización, tratamientos superficiales, drenaje sostenible, economía circular, gestión vial rural y sistemas inteligentes, establecer criterios técnicos de aplicabilidad para cada tipo de solución (según volumen de tránsito, clima, tipo de suelo y condiciones topográficas). También, promover la armonización normativa entre Provías Nacional, Provías Descentralizado y gobiernos subnacionales, fortaleciendo el enfoque territorial.
- 2. Fortalecimiento de capacidades técnicas en gobiernos regionales y locales.** La mayor parte de los CBVT son de competencia subnacional. Por ello, la implementación de soluciones requiere una estrategia de fortalecimiento institucional que incluya capacitación técnica permanente sobre diseño, ejecución y conservación de soluciones innovadoras; desarrollo de protocolos de supervisión y control de calidad aplicables a entornos rurales; y promoción de alianzas técnico-académicas con universidades, institutos y centros de investigación regionales.
- 3. Implementación progresiva mediante pilotos demostrativos.** Para facilitar la adopción de tecnologías innovadoras, se sugiere una estrategia basada en la implementación progresiva a través de proyectos piloto en corredores rurales representativos en cada región natural del país (Costa, Sierra y Selva); aplicar distintas soluciones innovadoras adaptadas al contexto local y evaluar su desempeño técnico, social y económico; y sistematizar resultados y establecer criterios de escalabilidad y replicabilidad.
- 4. Promoción de criterios de sostenibilidad en procesos de inversión pública.** Para garantizar que las soluciones innovadoras sean adoptadas de manera masiva, se deben incorporar criterios de sostenibilidad, resiliencia y eficiencia en los instrumentos de planificación y evaluación de proyectos. Es preciso incluir análisis de ciclo de vida y costos de mantenimiento en los estudios de preinversión, priorizar tecnologías que reduzcan el impacto ambiental y mejoren la eficiencia energética, e incorporar indicadores de desempeño en fichas técnicas del Banco de Inversiones, especialmente en proyectos del PIP (Programa de Inversión Pública) rural.

5. **Integración de tecnologías digitales y sistemas inteligentes.** El uso de tecnologías digitales para la planificación, ejecución y monitoreo de CBVT es esencial para optimizar recursos y mejorar resultados. Se recomienda implementar plataformas geoespaciales (GIS) para el inventario y priorización de intervenciones; incorporar modelos BIM para el diseño y mantenimiento predictivo; y promover el uso de sensores, drones y técnicas de IA para el monitoreo de condición de caminos rurales.
6. **Fomento de esquemas de participación y cogestión comunitaria.** La sostenibilidad de las soluciones implementadas requiere una apropiación local. Se recomienda establecer mecanismos de participación ciudadana desde la etapa de planificación hasta el mantenimiento rutinario; promover esquemas de gestión compartida y empleo local para la conservación de CBVT (por ejemplo, mantenimiento comunitario por niveles de servicio) y desarrollar incentivos para integrar a comunidades en la vigilancia vial y el control social de la infraestructura.
7. **Inclusión progresiva de innovación en el marco de PROREGIÓN.** Dada la cobertura y el impacto de este programa en la red rural nacional, se propone incluir criterios de innovación tecnológica en las bases de licitación de proyectos, establecer fichas técnicas diferenciadas para tecnologías no convencionales (como tratamientos con caucho reciclado o geosintéticos) y evaluar los tramos con mejores resultados para generar catálogos de buenas prácticas replicables en otros proyectos financiados por el Estado.

La implementación efectiva de soluciones innovadoras para los CBVT en el Perú no es únicamente un reto técnico, sino una oportunidad para transformar la forma en que el país concibe la infraestructura rural. Para ello, es indispensable adoptar una estrategia integrada que combine estandarización normativa, fortalecimiento institucional, financiamiento estratégico, digitalización, sostenibilidad ambiental y participación comunitaria. De esta manera se podrá asegurar que los caminos rurales no sean sólo una obra física, sino un verdadero motor de inclusión, resiliencia y desarrollo territorial.

Propuestas de políticas públicas y mejoras normativas

La modernización de los CBVT requiere soluciones técnicas apropiadas y estrategias de implementación, así como un marco político y normativo robusto, que promueva la equidad territorial, la sostenibilidad y la eficiencia en el uso de los recursos públicos. Actualmente, el marco regulatorio peruano presenta inconsistencias y fragmentaciones que dificultan una gestión integral y efectiva de los caminos rurales, especialmente en lo referido a priorización, financiamiento, ejecución y mantenimiento de estas vías.

Con base en el análisis de esta guía y en experiencias comparadas, se proponen las siguientes acciones estratégicas para el fortalecimiento del marco institucional y normativo:

1. **Reconocimiento explícito de los CBVT en las políticas nacionales de transporte.** Incluir a los CBVT como componente estratégico en los instrumentos nacionales de planificación sectorial, como el Plan Nacional de Infraestructura Sostenible para la Competitividad (PNISC), el Plan Nacional de Transporte Multimodal, y las políticas de conectividad territorial y desarrollo rural.
2. **Reformulación del marco normativo técnico para caminos rurales.** Son necesarias la actualización y armonización de manuales de diseño, conservación y gestión de caminos rurales, para incluir capítulos específicos sobre tecnologías de estabilización y recubrimientos adaptados, diseño geométrico con criterios de seguridad vial rural, drenaje sostenible, evaluación de condición con tecnologías disruptiva y gestión de activos viales a nivel local. Hay que establecer un marco de referencia para caminos rurales resilientes, alineado con objetivos de sostenibilidad, reducción de riesgos y adaptación al cambio climático.
3. **Impulso a una política nacional de conservación vial rural.** Se debe formular e institucionalizar una Política Nacional de Conservación de Caminos Rurales, con objetivos claros, mecanismos de financiamiento multianual y estrategias para mantenimiento preventivo. Se recomienda priorizar el mantenimiento rutinario con enfoque comunitario, creando programas que formalicen la participación de las poblaciones locales en la conservación de caminos y que garanticen recursos recurrentes para estas actividades, así como fomentar esquemas de conservación por niveles de servicio aplicables a CBVT, con métricas adaptadas a contextos rurales.
4. **Fortalecimiento del rol articulador de Provías Descentralizado.** Se trata de dotar a Provías Descentralizado de mayores capacidades para ejercer un rol técnico-normativo más fuerte, especialmente en la asistencia técnica, supervisión de calidad y monitoreo de caminos bajo jurisdicción local. Hay que impulsar una plataforma única de gestión vial rural que centralice los inventarios, programas de mantenimiento, proyectos y evaluación de condición de los CBVT del país, e integrar a Provías Descentralizado con las direcciones regionales y locales de infraestructura para evitar duplicidad de funciones y recursos.
5. **Marco legal para innovación y uso de tecnologías sostenibles.** Se recomienda incluir en la Ley de Contrataciones del Estado y su reglamento disposiciones que habiliten y promuevan el uso de tecnologías innovadoras y sostenibles en la infraestructura vial rural. Sería relevante crear una certificación técnica nacional de soluciones sostenibles aplicables a CBVT, similar a estándares internacionales como Greenroads o CETRA.
6. **Consolidación del enfoque territorial en la asignación de recursos.** Se recomienda reformular los criterios de priorización de inversiones para incluir variables como acceso a servicios esenciales (educación, salud, mercados), nivel de aislamiento y pobreza multidimensional y riesgo climático y vulnerabilidad geográfica.

- 7. Inserción de CBVT en políticas climáticas y de resiliencia.** Es necesario incorporar a los CBVT en las estrategias nacionales de adaptación al cambio climático, vinculando su mejora con la reducción de la vulnerabilidad territorial. Además, fomentar proyectos piloto de caminos rurales con soluciones basadas en la naturaleza y drenaje verde, especialmente en cuencas frágiles, y establecer incentivos para la reducción de emisiones y uso de materiales reciclados en caminos rurales mediante políticas de ecoeficiencia en obras públicas.

Una política pública efectiva para los CBVT debe ser multinivel, multisectorial y multiescalar, y debe ser reconocida su función estratégica para la cohesión territorial de Perú. Esto requiere ajustar el marco normativo vigente, consolidar capacidades institucionales descentralizadas y crear instrumentos de política que promuevan la sostenibilidad, la innovación y la resiliencia. Al alinear estos esfuerzos con los objetivos de desarrollo rural, gestión del riesgo y economía circular, se podrá construir una red vial rural moderna, equitativa y preparada para los desafíos del siglo XXI.

Plan de acción para la modernización de CBVT

La modernización de los CBVT en Perú requiere una acción planificada y progresiva, que combine intervenciones inmediatas con reformas estructurales sostenidas en el tiempo. Este plan propone una hoja de ruta articulada a partir de las necesidades, las soluciones propuestas y las experiencias prácticas sistematizadas en esta guía, priorizando la sostenibilidad, la innovación tecnológica, la equidad territorial y la eficiencia en el uso de los recursos.

A continuación, se presentan las acciones clave organizadas por horizonte temporal, acompañadas de ejes estratégicos que guían su implementación.

Corto plazo (1–2 años). Objetivo: Crear condiciones habilitantes para la mejora de la gestión y conservación de los CBVT, e iniciar procesos de implementación piloto de soluciones innovadoras, considerando las siguientes acciones como prioritarias:

- Establecer una unidad técnica especializada en CBVT dentro del MTC y Provías Descentralizado, con funciones de actualización normativa, asistencia técnica y articulación intergubernamental.
- Elaborar y publicar lineamientos técnicos actualizados sobre diseño geométrico, drenaje, estabilización de suelos, tratamientos superficiales y gestión de activos aplicables a CBVT.
- Iniciar pilotos demostrativos regionales con soluciones innovadoras (geosintéticos, asfaltos modificados, tratamientos con materiales reciclados, etc.) en corredores priorizados por su valor productivo o social.

- Invertir en capacitación técnica para equipos regionales y locales en temas de conservación rutinaria, gestión de activos, planificación territorial y tecnologías sostenibles.
- Incorporar módulos de evaluación y monitoreo con tecnologías disruptivas (drones, sensores, herramientas GIS, IA) en al menos tres regiones piloto.

Mediano plazo (3–5 años). Objetivo: Institucionalizar prácticas modernas de gestión, ampliar el escalamiento de soluciones sostenibles y consolidar sistemas regionales de gestión de activos. Las acciones prioritarias serían:

- Integrar el mantenimiento de CBVT al marco de presupuesto multianual, incluyendo esquemas de conservación por niveles de servicio y mantenimiento comunitario formalizado.
- Implementar una Plataforma Nacional de Gestión de Activos Viales Rurales, con inventarios digitales, evaluación de condición y programación de mantenimiento.
- Actualizar los criterios de priorización de inversiones del Banco de Proyectos del MEF para incorporar variables sociales, climáticas y de resiliencia en los CBVT.
- Ampliar la cobertura de soluciones adaptadas en al menos 30% de las intervenciones nuevas en caminos rurales, con base en las evaluaciones de los pilotos previos.
- Fortalecer la articulación con gobiernos regionales y locales, estableciendo programas de cofinanciamiento y asistencia técnica permanente para la conservación vial rural.

Largo plazo (6–10 años). Objetivo: Transformar estructuralmente la red de CBVT del país bajo un modelo sostenible, resiliente e integrado al desarrollo territorial. Se debería tomar en cuenta las siguientes acciones:

- Consolidar una Política Nacional de Caminos Rurales Sostenibles, como política pública transversal y de largo plazo, alineada con los ODS, el PEN y las NDC climáticas.
- Incluir estándares de sostenibilidad y economía circular obligatorios en todos los proyectos de infraestructura rural financiados por el Estado.
- Incorporar sistemáticamente tecnologías BIM y sistemas de monitoreo inteligente en todos los niveles del ciclo de vida de los CBVT.
- Garantizar que el 100% de los CBVT priorizados cuenten con plan de mantenimiento actualizado, respaldo financiero y trazabilidad técnica mediante plataformas digitales.

- Vincular los CBVT con la red de logística rural, turismo comunitario, cadenas de valor agrícola y programas de inclusión social, generando sinergias territoriales de desarrollo.

El presente plan de acción ofrece un marco operativo para transformar los CBVT de Perú en una infraestructura estratégica, resiliente e inclusiva. Su implementación requerirá voluntad política, inversión sostenida, coordinación intergubernamental y participación de las comunidades, así como un fuerte compromiso institucional con la innovación, la transparencia y la eficiencia. Este enfoque gradual y adaptativo permitirá pasar de una visión reactiva a una estrategia moderna de infraestructura rural como catalizadora del desarrollo territorial.

Lecciones aprendidas y buenas prácticas obtenidas del programa PROREGIÓN

PROREGIÓN, impulsado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú a través de Provías Descentralizado, ha sido una de las principales iniciativas orientadas a mejorar la conectividad territorial mediante la intervención de caminos departamentales y vecinales, muchos de ellos clasificados como CBVT. Con una cobertura nacional y una ejecución focalizada en zonas rurales con alto índice de pobreza y limitado acceso a servicios básicos, el programa ha generado importantes aprendizajes, tanto por sus logros como por sus desafíos.

A continuación, se sistematizan las principales lecciones aprendidas y buenas prácticas identificadas que deben ser consideradas en la implementación de futuras estrategias de modernización y sostenibilidad de la red vial rural.

Lecciones aprendidas

- **Importancia de la adecuación tecnológica al entorno rural.** En varios tramos intervenidos se identificaron fallas prematuras asociadas al uso de soluciones constructivas que no consideraban adecuadamente el clima, el tipo de suelo o el tránsito real. La experiencia mostró que el éxito técnico depende de adaptar las técnicas de estabilización y recubrimiento a las condiciones locales, utilizando tecnologías simples, durables y con bajo requerimiento de mantenimiento.
- **Incorporación del drenaje como parte esencial de la solución.** Una lección clave en las intervenciones de CBVT es la atención marginal o inexistente a los sistemas de drenaje, lo cual ha reducido significativamente la durabilidad y el desempeño de las soluciones aplicadas. La omisión de cunetas, alcantarillas y pendientes adecuadas ha sido una causa recurrente de fallas prematuras, lo que resalta la necesidad de considerar el drenaje como componente crítico en toda solución de ingeniería.

- **Necesidad de control de calidad y supervisión efectiva.** En proyectos de CBVT ejecutados bajo PROREGIÓN, se observaron inconsistencias en la aplicación de especificaciones técnicas y protocolos de control de calidad, especialmente en zonas remotas. Esto refuerza la importancia de contar con equipos técnicos capacitados, protocolos estandarizados de supervisión y monitoreo, y herramientas digitales para la trazabilidad de obra.
- **Limitaciones del modelo de conservación tradicional.** En muchos casos, el mantenimiento posterior a la intervención fue deficiente o inexistente, lo que aceleró el deterioro de las obras. Esto evidencia la urgencia de incorporar modelos de conservación por niveles de servicio y mantenimiento rutinario programado, incluso desde la fase de planificación del proyecto.
- **Fragmentación institucional y dificultades de articulación.** A pesar de los esfuerzos del programa, persistieron desafíos en la coordinación entre gobiernos locales, gobiernos regionales, Provías Descentralizado y otros actores nacionales. La experiencia señala la necesidad de mecanismos de gobernanza más claros y eficientes, que faciliten la articulación multinivel y el seguimiento de compromisos.

Buenas prácticas identificadas

- **Diseño de soluciones modulares y progresivas.** En zonas de difícil acceso, los tratamientos superficiales simples, la estabilización con materiales locales y otras alternativas permitieron implementar soluciones viables, replicables y sostenibles. Estos esquemas modulares facilitan la posterior mejora progresiva según la disponibilidad de recursos.
- **Inclusión de la comunidad en procesos de ejecución.** En varios proyectos, la participación de las comunidades en actividades de conservación rutinaria, limpieza de cunetas y vigilancia de obras generó mayor apropiación social, empleo local y reducción de costos. Este enfoque debe ser formalizado y replicado a través de contratos comunitarios con capacitación y asistencia técnica.
- **Aplicación de tecnologías geoespaciales para la priorización.** En algunos casos se emplearon herramientas GIS para identificar corredores críticos y priorizar tramos con mayor impacto territorial y social.
- **Creación de capacidades locales en gestión vial.** A través del programa se realizaron talleres, cursos y asistencia técnica para equipos municipales y regionales, mejorando su capacidad para formular, ejecutar y supervisar proyectos viales rurales. La institucionalización de programas de formación continua es clave para consolidar esta práctica.

- **Gobernanza y trabajo articulado.** Un aspecto importante es la implementación de estrategias de gobernanza y de actividades articuladas a lo largo de todo el ciclo de vida de la infraestructura, partiendo desde los estudios preliminares, la etapa de diseño a detalle, de construcción y de mantenimiento, abastecimiento y financiamiento.

El Programa PROREGIÓN constituye una fuente valiosa de aprendizajes sobre la gestión, diseño y conservación de CBVT en contextos rurales. Sus experiencias muestran que la innovación tecnológica debe ir acompañada de un enfoque territorial, participativo y basado en datos, así como de mecanismos institucionales sólidos para garantizar la sostenibilidad de las intervenciones. Aprovechar estas lecciones permitirá evitar errores pasados, replicar soluciones exitosas y fortalecer las futuras políticas públicas en infraestructura vial rural, contribuyendo a un Perú más conectado, resiliente e inclusivo.

Referencias

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2001). *Report 442 – Guidelines for Geometric Design of Very Low Volume Local Roads*. <https://store.transportation.org/Common/DownloadContentFiles?id=451&srsltid=AfmBOopCoZ7mWsRDw3k7GdpfYyeUFfubzBiFyo3axQ2zJnReg10f1XXQ>
- Asian Development Bank (ADB) (2020). *Sustainable Rural Roads for Development*. <https://www.adb.org/projects/40515-013/main>
- Astarita, V., Giofrè, V. P., Mirabelli, G., & Solina, V. (2020). A Review of Blockchain-Based Systems in Transportation. *Information*, 11(1), 21. <https://doi.org/10.3390/info11010021>
- Banco Interamericano de Desarrollo (2014). *Infraestructura sostenible para la competitividad y el crecimiento inclusivo*. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Infraestructura-sostenible-para-la-competitividad-y-el-crecimiento-inclusivo.pdf>
- Banco Mundial (2015). *Mejorando la sostenibilidad ambiental en proyectos viales*. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/111971468197383507/pdf/93903-SPANISH-NWP-P148424-PUBLIC-Box393259B-Spanish-version-Env-Sus-Roads-Web-11202015.pdf>
- CAF (2010). *Soluciones e innovaciones tecnológicas para caminos de bajo tránsito en América Latina*. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/401>
- CEEQUAL (BRE Group). *CEEQUAL Manual for Projects*.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2020). *Caminos rurales: vías claves para la producción, la conectividad y el desarrollo sostenible*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45781/1/S2000418_es.pdf
- Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales (CLACSO)(2002). *El beneficio de los caminos rurales: ampliando oportunidades de ingreso para los pobres*. <https://biblioteca.clacso.edu.ar/Peru/grade/20100511023603/ddt40ES.pdf>
- De Solminihaç, H., T. Echaveguren, and A. Chamorro (2020). *Gestión de Infraestructura Vial*. Dictuc – Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the Circular Economy*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>

- FHWA (1999). Asset Management Primer. U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/asset/>
- FHWA (2016). *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/11021/index.cfm>
- Greenroads Foundation (2020). Greenroads Rating System v3.0.
- Grupo RAUROS, ICARO – Herramienta de gestión vial. <https://www.gruporauros.com/Icaro>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). *Perú: Evolución de la Pobreza Monetaria 2014-2023*. <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/5558432-cifras-de-pobreza-2023>
- Institute for Sustainable Infrastructure (ISI) (2021). *Envision Sustainable Infrastructure Framework*. <https://sustainableinfrastructure.org/envision/>
- International Labour Organization (ILO) (2016). *Local Resource-Based Approaches for Rural Infrastructure*. https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@ed_emp/documents/publication/wcms_758539.pdf
- International Organization for Standardization, ISO 55001: Asset management — Management systems — Requirements, ISO, 2014. <https://www.iso.org/standard/83054.html>
- ISO (2006). *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework* (ISO 14040:2006).
- Kerali, H. G. R (2000). *Highway Development and Management* (HDM-4). Overview – Volume 4, PIARC – World Road Association.
- Lebaku, P. K. R., Gao, L., Lu, P., & Sun, J. (2024). “Deep Learning for Pavement Condition Evaluation Using Satellite Imagery”. *Infrastructures*, 9(9), 155. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9090155>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008). *Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito*.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2015). *Manual de Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito*. <https://www.sutran.gob.pe/wp-content/uploads/2015/08/manualdedisenodecarreterasnopavimentadasdebajovolumendetransito.pdf>

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018). *Manual de Carreteras DG-2018: Diseño Geométrico*. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual.de.Carreteras.DG-2018.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). *Anuario Estadístico 2023*. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/5871728-anuario-estadistico-2023>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). *Plan Nacional de Desarrollo Ganadero*. <https://repositorio.midagri.gob.pe/jspui/handle/20.500.13036/330>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). *Anuario Estadístico 2023*. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/5871728-anuario-estadistico-2023>
- NCHRP (1999). *Report 442 – Guidelines for Geometric Design of Very Low Volume Local Roads*. [https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP20-07\(75\)_FR.pdf](https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP20-07(75)_FR.pdf)
- OECD (2020). *Circular Economy in Cities and Regions*. <https://www.oecd.org/en/topics/circular-economy-in-cities-and-regions.html>
- PIARC (2022). *Use of Recycled Materials in Pavements - Case studies* <https://www.piarc.org/en/order-library/37076-en-Use%20of%20Recycled%20Materials%20in%20Pavements%20-%20Case%20studies>
- PIARC (2022). *Road Safety Manual*. <https://roadsafety.piarc.org/en>
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2019). *Guidelines for Environmentally Sustainable Road Construction*. <https://www.unep.org/explore-topics/green-economy/what-we-do/sustainable-infrastructure-investment>
- USAID/USDA. (2003). *Low Volume Roads Engineering: Best Management Practices Field Guide*. https://www.fs.usda.gov/t-d/programs/forest_mgmt/projects/lowvolroads/foreword.pdf
- Yanginlar, G. (2024). “Internet of Things (IoT) in Intelligent Transportation Systems: Benefits and Challenges of Implementation”. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, 27, 16-23. <https://doi.org/10.55549/epstem.1517792>
- Zofnass Program – Harvard University (2020). *Envision Sustainable Infrastructure Framework*.

