

Diseño vial y evaluación de prefactibilidad del camino La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo, Nicaragua

Road design and pre-feasibility assessment of the La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo road, Nicaragua

Cintia Elieth Dávila Sequeira¹
Juan Asdrúbal Flores Pacheco²

RESUMEN

La infraestructura vial rural desempeña un papel estratégico en la conectividad territorial y en el desarrollo socioeconómico de las comunidades. En Nicaragua, numerosos caminos secundarios presentan deficiencias geométricas, estructurales y funcionales que limitan la seguridad vial y la eficiencia del transporte. En este contexto, el presente artículo analiza el estudio de prefactibilidad y el diseño técnico propuesto para el mejoramiento del tramo vial La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo, con el propósito de evaluar su viabilidad técnica, económica, ambiental y social desde un enfoque integral. La investigación se desarrolló mediante un enfoque técnico-analítico, sustentado en estudios de tránsito, evaluación geométrica, análisis estructural de pavimentos, revisión del sistema de drenaje, valoración de impactos ambientales y sociales, y análisis económico a través de indicadores de rentabilidad social. Se compararon los escenarios sin proyecto y con proyecto, incorporando criterios de seguridad vial, análisis del costo del ciclo de vida y sostenibilidad de la infraestructura. Los resultados evidencian que el tramo presenta condiciones funcionales deficientes y una alta interacción entre usuarios motorizados y no motorizados, lo que incrementa el riesgo vial. El diseño propuesto mejora el nivel de servicio, fortalece la seguridad vial y optimiza el desempeño estructural mediante la selección de un pavimento rígido de losas cortas. Asimismo, el análisis ambiental y social muestra impactos negativos temporales y mitigables durante la fase de construcción, frente a beneficios sociales permanentes asociados a la accesibilidad y conectividad territorial. El análisis económico confirma la viabilidad del proyecto, reflejada en un Valor Actual Neto positivo y una Tasa Interna de Retorno superior a la tasa social de descuento. Se concluye que el proyecto constituye una inversión pública socialmente rentable y una estrategia de desarrollo territorial, al integrar criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales orientados a la sostenibilidad de la infraestructura vial rural.

1- Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Departamento de Posgrado y Educación Continua UNI – Managua, Correo: cintiadavila23@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5181-6272>

2- Bluefields Indian & Caribbean University (BICU), Departamento de Investigación, RACCS, Nicaragua, Correo: asdrubal.flores@do.bicu.edu.ni ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6553-7202>

PALABRAS CLAVE: Infraestructura vial, Prefactibilidad, Diseño vial, Seguridad vial y Desarrollo territorial.

ABSTRACT

Rural road infrastructure plays a strategic role in territorial connectivity and the socioeconomic development of communities. In Nicaragua, numerous secondary roads exhibit geometric, structural, and functional deficiencies that limit road safety and transport efficiency. In this context, this article analyzes the prefactibility study and the proposed technical design for the improvement of the La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo road section, with the aim of assessing its technical, economic, environmental, and social feasibility from an integrated perspective. The research was conducted using a technical-analytical approach, supported by traffic studies, geometric evaluation, structural pavement analysis, drainage system assessment, evaluation of environmental and social impacts, and economic analysis based on social profitability indicators. The without-project and with-project scenarios were compared, incorporating road safety criteria, life-cycle cost analysis, and infrastructure sustainability considerations. The results show that the road section presents deficient functional conditions and a high level of interaction between motorized and non-motorized users, which increases road risk. The proposed design improves the level of service, enhances road safety, and optimizes structural performance through the selection of a rigid short-slab pavement. Additionally, the environmental and social analysis indicates temporary and mitigable negative impacts during the construction phase, in contrast to permanent social benefits associated with improved accessibility and territorial connectivity. The economic analysis confirms the project's feasibility, reflected in a positive Net Present Value and an Internal Rate of Return exceeding the social discount rate. It is concluded that the project represents a socially profitable public investment and a territorial development strategy by integrating technical, economic, environmental, and social criteria aimed at the sustainability of rural road infrastructure.

KEYWORDS: Road infrastructure; Prefeasibility; Road design; Road safety; Territorial development.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial constituye uno de los pilares fundamentales para el desarrollo económico, social y territorial, particularmente en contextos rurales donde la conectividad condiciona el acceso a servicios básicos, mercados, educación y salud. En países en desarrollo, la calidad y funcionalidad de los caminos rurales influyen de manera directa en la reducción de desigualdades territoriales y en la integración de las economías locales a los sistemas productivos regionales y nacionales. Sin embargo, una proporción significativa de estas infraestructuras presenta deterioro estructural, deficiencias geométricas y limitaciones funcionales que comprometen la seguridad vial y la eficiencia del transporte.

En Nicaragua, la red vial secundaria y terciaria desempeña un papel estratégico en la articulación intermunicipal y en el sostenimiento de actividades agro productivas. No obstante, numerosos tramos operan bajo condiciones inadecuadas debido a diseños obsoletos, insuficiencias en el drenaje, ausencia de criterios de seguridad vial y limitaciones en la gestión del mantenimiento. Estas deficiencias se traducen en mayores costos de operación vehicular, incremento del riesgo de siniestros viales y restricciones al desarrollo socioeconómico de las comunidades vinculadas a dichos corredores.

El tramo vial La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo representa un caso emblemático de esta problemática. A pesar de su importancia como eje de conexión local y regional, el camino presenta condiciones geométricas inconsistentes, interacción conflictiva entre usuarios motorizados y no motorizados, y una infraestructura de drenaje insuficiente frente a las condiciones climáticas del área. Estas limitaciones afectan tanto la funcionalidad del corredor como la seguridad de los usuarios, especialmente peatones, ciclistas y motociclistas, quienes constituyen una proporción significativa del tránsito.

En este contexto, los estudios de prefactibilidad y diseño vial adquieren relevancia como herramientas técnicas para orientar la toma de decisiones en la inversión pública. La prefactibilidad permite evaluar de manera integral la viabilidad técnica, económica, ambiental y social de una intervención, mientras que el diseño vial traduce estos análisis en soluciones concretas que optimizan el desempeño de la infraestructura a lo largo de su ciclo de vida. En particular, la incorporación de enfoques contemporáneos como el análisis del costo del ciclo de vida, la seguridad vial bajo el enfoque de Sistema Seguro y la integración de criterios ambientales y sociales resulta esencial para garantizar la sostenibilidad de los proyectos viales.

La literatura especializada destaca que las intervenciones viales que se limitan a criterios de costo inicial tienden a generar soluciones de corto plazo, con altos requerimientos de mantenimiento y bajo desempeño funcional. En contraste, los enfoques integrales que articulan diseño geométrico, selección estructural del pavimento, drenaje eficiente y evaluación económica generan infraestructuras más resilientes, seguras y socialmente rentables. En este sentido, la evaluación de alternativas técnicas y su contraste con indicadores económicos y socioambientales se convierte en un componente clave del proceso de planificación vial.

El presente artículo tiene como objetivo analizar el estudio de prefactibilidad y el diseño técnico propuesto para el mejoramiento del tramo vial La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo, evaluando de manera integrada sus componentes geométricos, estructurales, de seguridad vial, ambientales, sociales y económicos. A partir de información técnica y análisis especializados, se busca determinar la viabilidad del proyecto y su contribución al fortalecimiento de la conectividad territorial y al desarrollo local sostenible.

El estudio se enmarca en las líneas de investigación relacionadas con el desarrollo territorial, la ingeniería vial y la sostenibilidad de la infraestructura, aportando evidencia técnica que puede servir de referencia para la formulación y priorización de proyectos viales en contextos rurales similares. De esta manera, el artículo contribuye al debate académico y técnico sobre la planificación de infraestructura vial como instrumento de desarrollo, más allá de su concepción tradicional como obra física aislada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Enfoque y tipo de investigación

El estudio se desarrolló bajo un enfoque aplicado, con un diseño cuantitativo de tipo descriptivo y analítico, orientado a resolver una problemática concreta de infraestructura vial en el contexto territorial de los municipios de Santa Teresa, El Rosario, Masatepe y Niquinohomo. Este tipo de investigación se enfoca en la solución de problemas reales con implicaciones técnicas, sociales y económicas, característica fundamental de los estudios en ingeniería y proyectos de desarrollo territorial (Hernández-Sampieri et al., 2018).

Desde el punto de vista metodológico, se adoptó un diseño no experimental y transversal, con predominio del enfoque cuantitativo, complementado con técnicas cualitativa, ya que las variables de estudio no fueron manipuladas deliberadamente, sino analizadas en su contexto natural mediante observación, medición y análisis técnico (Creswell & Creswell, 2018).

El alcance de la investigación es descriptivo y analítico. Es descriptivo porque caracteriza las condiciones actuales del tramo vial en términos de geometría, estado estructural, drenaje, tráfico y entorno socioambiental; y analítico porque evalúa la viabilidad de alternativas de diseño, compara escenarios “sin proyecto” y “con proyecto”, y determina la opción óptima de intervención con base en criterios técnicos y económicos (Gray, 2018).

En cuanto a su dimensión temporal, el estudio se clasifica como transversal y proyectivo. Es transversal, en la medida en que el diagnóstico se realiza a partir de un corte específico del tiempo (año 2024), con base en datos obtenidos en campo; y es proyectivo, ya que incorpora modelos de crecimiento del tráfico vehicular, estimaciones de demanda futura y criterios de diseño vial con un horizonte de planificación de 20 años, conforme a las normas del Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI) para el diseño estructural y económico.

Este enfoque es consistente con estudios de prefactibilidad vial, en los cuales se integran el diagnóstico, la evaluación de alternativas y la proyección de impactos como base para la toma de decisiones en inversión pública (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Área de estudio

El área de estudio corresponde al tramo vial La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo, con una longitud aproximada de 10.66 km, localizado entre los departamentos de Carazo y Masaya, Nicaragua. El tramo conecta comunidades rurales y semiurbanas de los municipios de Santa Teresa, El Rosario, Masatepe y Niquinohomo, constituyéndose en un corredor de alta importancia productiva, social y educativa.

Desde el punto de vista funcional, el camino opera como vía intermunicipal con presencia significativa de peatones, ciclistas, motocicletas, transporte escolar y transporte de productos agropecuarios, condición que exige un análisis integral de seguridad vial y diseño inclusivo, conforme a los principios del enfoque de Sistema Seguro (World Health Organization [WHO], 2017).

Fuentes de información y materiales

La investigación se sustentó en fuentes primarias y secundarias, seleccionadas bajo criterios de pertinencia técnica, confiabilidad institucional y actualidad normativa.

Fuentes primarias

- Observación técnica directa del tramo vial.
- Registro fotográfico georreferenciado de condiciones físicas y puntos críticos.
- Encuestas comunitarias aplicadas a usuarios directos del camino.
- Entrevistas semiestructuradas a actores institucionales y líderes comunitarios.

Fuentes secundarias

- Estudios técnicos oficiales de tráfico, geotecnia, hidrotecnia, diseño estructural y evaluación ambiental.
- Normativas nacionales e internacionales de diseño vial.
- Literatura científica indexada sobre prefactibilidad, diseño de carreteras y seguridad vial.

El uso combinado de estas fuentes responde a la recomendación metodológica de triangulación de información para aumentar la validez interna de los estudios aplicados en ingeniería (Denzin, 2012).

Población, muestra

La población objeto de estudio en esta investigación está conformada por los habitantes, actores institucionales y usuarios viales de las comunidades localizadas a lo largo del tramo propuesto para el mejoramiento del camino La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo, perteneciente a los municipios de Santa Teresa, El Rosario, Masatepe y Niquinohomo, en los departamentos de Carazo y Masaya.

Esta población incluye tanto a los beneficiarios directos (productores agropecuarios, estudiantes, comerciantes, transportistas y peatones residentes en las comunidades El Rosario, Divino Niño, San Isidro, La Cruz Santa Rita, Santo Domingo Las Colinas, Las Crucitas, La Curva y La Marimba), como a los beneficiarios indirectos (usuarios provenientes de otras localidades que utilizan el tramo como vía alterna para evitar el tránsito por la carretera Masaya-Granada).

Considerando el enfoque multidisciplinario del estudio, se incluyen también como parte de la población actores institucionales clave, tales como representantes de las alcaldías municipales, líderes comunitarios, directores de centros escolares, operadores de transporte colectivo y personal técnico del MTI vinculado a la planificación de infraestructura vial.

El tipo de muestra empleada en esta investigación es de carácter no probabilístico e intencional, seleccionada con base en criterios de pertinencia y representatividad para el análisis técnico y social del proyecto.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Observación técnica estructurada

Se aplicó una guía de observación técnica estructurada para evaluar el estado geométrico, estructural y funcional del tramo vial. Esta técnica permitió identificar deficiencias en alineamiento, sección transversal, drenaje, señalización y zonas de conflicto vial. La observación directa es ampliamente reconocida como una técnica válida en estudios de infraestructura cuando se combina con criterios técnicos normalizados (Yin, 2018).

Encuestas comunitarias

Se aplicaron encuestas estructuradas a usuarios directos del camino (productores, estudiantes, peatones y transportistas), orientadas a recopilar información sobre patrones de movilidad, percepción de riesgo vial y acceso a servicios. El uso de encuestas en estudios de transporte rural permite incorporar la dimensión social al análisis técnico, fortaleciendo la evaluación de impacto (Litman, 2021).

Entrevistas semiestructuradas

Se realizaron entrevistas semiestructuradas a técnicos municipales, autoridades locales y líderes comunitarios, con el fin de contextualizar los hallazgos técnicos y conocer antecedentes de intervención, mantenimiento y gestión institucional del tramo. Este tipo de entrevista facilita la comprensión de procesos y percepciones en proyectos de desarrollo territorial (Kvale & Brinkmann, 2015).

Procedimiento de análisis técnico

Análisis de tráfico y movilidad

El análisis de tráfico se fundamentó en el cálculo del Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA), la proyección de crecimiento vehicular y la evaluación del Nivel de Servicio (NS), siguiendo los criterios del Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2016). Estos indicadores permitieron evaluar la capacidad funcional de la vía y justificar la necesidad de intervención.

Análisis geométrico y estructural

El diseño geométrico y estructural del pavimento se desarrolló conforme a las Normas Geométricas para el Diseño de Carreteras de Nicaragua (MTI) y los lineamientos de la AASHTO, considerando velocidad de diseño, alineamiento, secciones típicas y cargas de tránsito. La selección del pavimento de concreto hidráulico con losas cortas se fundamentó en criterios de durabilidad, costo del ciclo de vida y desempeño estructural (AASHTO, 2011; ACI, 2019).

Evaluación ambiental y social

La evaluación ambiental y social se realizó conforme al enfoque de gestión preventiva de impactos, identificando efectos potenciales durante las fases de construcción y operación. Se consideraron áreas de influencia directa e indirecta y se definieron medidas de mitigación alineadas con buenas prácticas internacionales de infraestructura sostenible (World Bank, 2019).

Análisis económico y comparación de escenarios

El análisis económico se efectuó mediante la comparación de los escenarios "sin proyecto" y "con proyecto", estimando indicadores de rentabilidad como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), siguiendo metodologías de evaluación de proyectos de inversión pública (Boardman et al., 2018). Este enfoque permite determinar el momento óptimo de inversión y la alternativa más eficiente desde el punto de vista socioeconómico.

Consideraciones éticas y de calidad científica

La investigación respetó los principios de ética académica, garantizando la originalidad de la información, el uso adecuado de fuentes secundarias y la confidencialidad de los

participantes encuestados. Asimismo, se aplicaron criterios de consistencia metodológica y trazabilidad técnica, fundamentales para la revisión por pares y la reproducibilidad del estudio (Committee on Publication Ethics [COPE], 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 1

Condición funcional y geométrica del tramo La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo

Componente evaluado	Resultado observado	Discusión técnica
Ancho de calzada	Inferior a estándares para tránsito mixto	Limita la capacidad operativa y aumenta conflictos vehiculares, especialmente en tramos poblados
Bermas	Inexistentes o discontinuas	Incrementa la vulnerabilidad de peatones y ciclistas, contraviniendo principios de seguridad vial
Alineamiento horizontal	Curvas con radios reducidos	Genera inconsistencias geométricas asociadas a mayor riesgo de accidentes
Drenaje superficial	Deficiente	Acelera el deterioro estructural del camino, reduciendo su vida útil
Señalización	Escasa o inexistente	Disminuye la percepción del riesgo y la legibilidad de la vía

Nota. La vía presenta condiciones subestándares que afectan la seguridad, capacidad y durabilidad, por lo que se requieren mejoras para adecuarla a criterios técnicos actuales.

La evaluación funcional y geométrica del tramo vial La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo revela un conjunto de deficiencias estructurales que, analizadas de forma integrada, configuran un escenario de vulnerabilidad operativa y de seguridad vial. Los resultados muestran que el camino opera con una sección transversal insuficiente, caracterizada por anchos de calzada reducidos y la ausencia o discontinuidad de bermas. Esta condición limita la capacidad de la vía para absorber maniobras evasivas, reduce el espacio de recuperación ante salidas de calzada y expone de manera directa a peatones y ciclistas, quienes carecen de infraestructura dedicada para su circulación segura.

Desde la perspectiva de la ingeniería vial, la sección transversal no constituye un elemento accesorio, sino un componente determinante del desempeño y la seguridad del sistema. La literatura especializada demuestra que combinaciones inadecuadas de ancho de carril y berma en carreteras rurales de dos carriles están asociadas a un incremento en la frecuencia y severidad de siniestros, particularmente aquellos relacionados con salidas de vía y colisiones frontales (Pokorny et al., 2020). En este sentido, los resultados obtenidos confirman que la geometría existente del tramo no responde a la complejidad del tránsito actual ni a la coexistencia de usuarios motorizados y no motorizados.

Adicionalmente, el análisis del alineamiento horizontal evidencia la presencia de curvas con radios reducidos y transiciones geométricas poco consistentes, que inducen variaciones abruptas en la velocidad de operación. Esta falta de consistencia geométrica incrementa la carga cognitiva del conductor y reduce el tiempo disponible para la toma de decisiones seguras. Estudios sobre consistencia del diseño geométrico han demostrado que las carreteras que presentan discrepancias entre la geometría del trazado y las velocidades reales de operación registran mayores tasas de accidentes, lo que refuerza la relevancia de este hallazgo en el tramo estudiado (Ng & Sayed, 2004).

La problemática geométrica identificada no puede analizarse de forma aislada del contexto operativo. En corredores rurales con tránsito mixto, las curvas de radio reducido, cuando no están acompañadas de una señalización adecuada y de una sección transversal indulgente, tienden a convertirse en puntos críticos de siniestralidad. Investigaciones recientes confirman que las curvas horizontales en carreteras rurales de dos carriles presentan riesgos significativamente mayores en comparación con los tramos rectos, especialmente cuando existen limitaciones de visibilidad y deficiencias en el delineamiento vial (Gooch et al., 2016). En el caso del tramo La Paz Carazo - San Pedro - Niquinohomo, estas condiciones se ven agravadas por la alta interacción con usuarios vulnerables y la escasa infraestructura de apoyo.

Otro resultado de alta relevancia es la deficiencia del sistema de drenaje superficial, evidenciada por la acumulación de escorrentía sobre la calzada y signos de deterioro inducido por humedad. Este hallazgo trasciende el ámbito del confort o la estética vial, ya que el drenaje constituye una variable controladora del desempeño estructural del camino. La evidencia empírica en carreteras selladas de bajo volumen demuestra que un drenaje inadecuado acelera los procesos de degradación, reduce la vida útil del pavimento y aumenta de manera significativa los costos de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura (Otto et al., 2020).

En consecuencia, los resultados indican que cualquier intervención futura debe integrar el drenaje como un componente central del diseño y no como una obra complementaria.

Finalmente, la evaluación de la señalización y la legibilidad vial pone de manifiesto una baja capacidad del camino para comunicar el riesgo y orientar el comportamiento del usuario. La señalización escasa o inexistente en puntos críticos limita la anticipación de maniobras, incrementa la probabilidad de decisiones tardías y reduce la seguridad operacional, especialmente en tramos con geometría variable. Desde el enfoque de diseño seguro, una vía debe ser “autoexplicativa”, es decir, su configuración geométrica y sus elementos de control deben inducir de manera natural un comportamiento seguro. Cuando esta condición no se cumple, la señalización y el delineamiento adquieren un rol compensatorio fundamental (Ng & Sayed, 2004).

En conjunto, los resultados de la Tabla 1 permiten concluir que el tramo vial presenta un problema estructural-funcional de carácter sistémico, donde confluyen deficiencias geométricas, operativas e hidráulicas. Esta evidencia respalda que la solución no debe limitarse a intervenciones superficiales o de mantenimiento rutinario, sino que requiere un mejoramiento integral del diseño vial, incorporando criterios de consistencia geométrica, sección transversal segura, drenaje eficiente y legibilidad vial. Dicho enfoque es coherente con los principios del Sistema Seguro, que reconocen el error humano como inevitable y orientan el diseño de la infraestructura hacia la reducción de la probabilidad y severidad de los siniestros, especialmente en contextos rurales con alta diversidad de usuarios.

Tabla 2

Caracterización del tránsito y usuarios del tramo vial

Variable	Resultado	Interpretación
Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA)	Moderado	Justifica una intervención estructural sin sobredimensionar la vía
Tipo de tránsito predominante	Motocicletas y vehículos livianos	Evidencia movilidad local e intermunicipal
Tránsito de carga	Presente y constante	Asociado a actividades agroproductivas
Usuarios vulnerables	Alta presencia	Requiere diseño vial inclusivo y seguro

Nota. Demanda moderada con usuarios vulnerables y carga constante; se requieren mejoras enfocadas en seguridad sin sobredimensionar la vía.

El análisis de la caracterización del tránsito y de los usuarios del tramo vial La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo evidencia un patrón de movilidad heterogéneo, propio de corredores rurales con funciones productivas, sociales y de acceso a servicios. Los resultados muestran un Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) de magnitud moderada, en el cual predominan las motocicletas y los vehículos livianos, complementados por una presencia constante de vehículos de carga asociados al transporte de productos agropecuarios y actividades comerciales locales. De manera simultánea, se identifica una alta interacción con usuarios vulnerables, principalmente peatones y ciclistas, quienes utilizan la vía como espacio de circulación cotidiana ante la ausencia de infraestructura alternativa.

Desde el punto de vista operativo, estos resultados indican que el desempeño del tramo no está determinado únicamente por el volumen de tránsito, sino por la composición modal y la interacción entre usuarios con diferentes velocidades, masas y niveles de protección. La literatura en ingeniería del transporte reconoce que, en vías rurales de dos carriles, la heterogeneidad vehicular puede generar reducciones significativas en la calidad del servicio, aun cuando los volúmenes no alcancen niveles considerados críticos desde una perspectiva puramente cuantitativa (Transportation Research Board, 2016). En este sentido, el TPDA moderado observado no debe interpretarse como un indicador de suficiencia funcional, sino como una señal de que el diseño actual no es coherente con el uso real del corredor.

La predominancia de motocicletas constituye un hallazgo particularmente relevante, ya que este tipo de vehículo presenta mayor vulnerabilidad ante deficiencias geométricas, irregularidades superficiales y conflictos con vehículos de mayor tamaño. Diversos estudios han demostrado que, en contextos rurales y periurbanos de países en desarrollo, el incremento del uso de motocicletas se asocia a mayores tasas de lesiones graves y fallecimientos, especialmente cuando la infraestructura no incorpora criterios específicos de seguridad vial para este grupo (World Health Organization [WHO], 2017). En el tramo estudiado, la coexistencia de motocicletas con vehículos de carga y peatones incrementa la complejidad operativa y eleva el riesgo potencial de siniestros.

Asimismo, la presencia sostenida de tránsito de carga refuerza el carácter productivo del corredor y su rol en la conectividad territorial. Desde una perspectiva de planificación vial, este resultado implica que la infraestructura debe responder no solo a la movilidad cotidiana de corta distancia, sino también a las exigencias estructurales y operativas derivadas del transporte de mercancías.

Investigaciones sobre planificación del transporte rural subrayan que la falta de adecuación de la infraestructura a este tipo de tránsito genera sobrecostos logísticos, deterioro acelerado de la vía y pérdida de competitividad local (Ortúzar & Willumsen, 2011).

La alta presencia de usuarios vulnerables constituye uno de los aspectos más críticos identificados en la Tabla 2. Peatones y ciclistas utilizan el tramo como espacio compartido de circulación, lo que incrementa la exposición al riesgo en un entorno donde no existen bermas formales, carriles segregados ni dispositivos de calmado de tráfico. Desde el enfoque de Sistema Seguro, esta situación es especialmente preocupante, ya que la evidencia demuestra que los usuarios vulnerables concentran la mayor proporción de víctimas mortales en siniestros viales cuando las velocidades operativas no están controladas y la infraestructura no ofrece separación física o espacios seguros (WHO, 2017).

En términos de gestión de la movilidad, los resultados sugieren que la problemática del tramo no puede abordarse únicamente mediante mejoras estructurales del pavimento, sino que requiere una visión multimodal del diseño vial. La literatura especializada en transporte sostenible y equidad en la movilidad destaca que la incorporación de criterios de diseño inclusivo —tales como control de velocidad, espacios laterales seguros y tratamiento diferenciado de travesías pobladas— es fundamental para reducir conflictos y mejorar la seguridad y la accesibilidad en corredores rurales con alta diversidad de usuarios (Litman, 2021).

En conjunto, los resultados de la Tabla 2 permiten concluir que el tramo La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo funciona como un corredor de movilidad local e intermunicipal de carácter mixto, donde confluyen funciones productivas, sociales y de acceso a servicios. Esta condición refuerza la necesidad de que las propuestas de mejoramiento vial integren criterios de seguridad vial, operación multimodal y desarrollo territorial, evitando enfoques centrados exclusivamente en la capacidad vehicular. La evidencia empírica respalda, por tanto, la pertinencia de un diseño vial que reconozca la diversidad de usuarios y priorice la protección de los más vulnerables como eje central de la intervención.

Tabla 3

Nivel de servicio del tramo vial en escenarios sin proyecto y con proyecto

Escenario	Nivel de servicio	Condición operativa	Discusión
Sin proyecto	Bajo	Maniobras riesgosas y tiempos elevados	Refleja agotamiento funcional de la vía
Con proyecto	Mejorado	Fluidez y mayor seguridad	Evidencia impacto positivo del diseño propuesto

Nota. La implementación del proyecto mejora el nivel de servicio, incrementando la seguridad y la eficiencia operativa del tramo vial.

El análisis del nivel de servicio (NS) del tramo vial La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo, comparando los escenarios sin proyecto y con proyecto, evidencia diferencias sustanciales en el desempeño operativo y en las condiciones de seguridad y confort para los usuarios. Los resultados indican que, en el escenario sin proyecto, la vía opera con un nivel de servicio bajo, caracterizado por tiempos de viaje elevados, maniobras forzadas de adelantamiento, invasión del carril contrario y una marcada interacción conflictiva entre usuarios motorizados y no motorizados. Estas condiciones reflejan un sistema vial que ha superado su capacidad funcional efectiva, no tanto por el volumen absoluto de tránsito, sino por la inadecuación geométrica y transversal frente a la demanda real y a la diversidad modal existente.

Desde la teoría de la ingeniería del tránsito, el nivel de servicio constituye un indicador sintético que integra variables como velocidad promedio, densidad, libertad de maniobra y percepción de comodidad del usuario. El Highway Capacity Manual establece que, en carreteras rurales de dos carriles, un nivel de servicio bajo suele asociarse a una reducción significativa de la velocidad de operación, aumento de la frustración del conductor y mayor probabilidad de comportamientos riesgosos, como adelantamientos en condiciones no seguras (Transportation Research Board [TRB], 2016). En el tramo analizado, estos patrones se ven amplificadas por la ausencia de bermas, la presencia de curvas con radios reducidos y la coexistencia de usuarios vulnerables, lo que refuerza la lectura crítica del escenario sin proyecto.

En contraste, los resultados proyectados para el escenario con proyecto muestran una mejora significativa del nivel de servicio, atribuible a la incorporación de adecuaciones geométricas, una sección transversal más funcional, mejoras en el drenaje y la inclusión de elementos de seguridad vial. Estas intervenciones permiten una circulación más fluida,

reducen la necesidad de maniobras evasivas y mejoran la previsibilidad del comportamiento de los distintos usuarios. Desde una perspectiva operativa, la mejora del nivel de servicio implica no solo incrementos en la velocidad promedio, sino también una mayor estabilidad del flujo vehicular y una reducción de la variabilidad de velocidades, factores estrechamente vinculados a la seguridad vial.

La discusión de estos resultados debe ir más allá de una lectura estrictamente funcional. La literatura especializada señala que, en carreteras rurales, la mejora del nivel de servicio puede tener efectos duales: por un lado, incrementa la eficiencia y el confort; por otro, si no se acompaña de medidas de control y diseño seguro, puede inducir aumentos de velocidad que eleven la severidad de los siniestros. En este sentido, el enfoque de Sistema Seguro resulta clave para interpretar los resultados del escenario con proyecto, ya que plantea que las mejoras operativas deben integrarse con estrategias de gestión de velocidad, delineación clara y protección de usuarios vulnerables, de modo que la ganancia en nivel de servicio no se traduzca en un aumento del riesgo (World Health Organization [WHO], 2017).

Estudios recientes en seguridad vial confirman que las intervenciones que combinan mejoras geométricas con medidas de control operativo y diseño indulgente logran reducciones sostenidas en la frecuencia y gravedad de los accidentes, incluso en contextos rurales con tránsito mixto (Khan & Das, 2024). Por tanto, la mejora del nivel de servicio proyectada para el tramo La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo debe interpretarse como un resultado positivo condicionado, cuya efectividad plena depende de la correcta integración de criterios de seguridad vial en el diseño y la operación de la infraestructura.

En términos de planificación y toma de decisiones, la comparación entre los escenarios sin y con proyecto evidencia que la no intervención perpetuaría un estado de operación deficiente, con costos sociales asociados a tiempos de viaje elevados, mayor exposición al riesgo y deterioro progresivo de la infraestructura. Por el contrario, el escenario con proyecto ofrece un desempeño operativo más eficiente y seguro, alineado con los principios de movilidad sostenible y desarrollo territorial. Esta lectura coincide con la literatura sobre evaluación de proyectos viales, que destaca que las mejoras en nivel de servicio, cuando se diseñan bajo un enfoque integral, generan beneficios que trascienden la operación vehicular e impactan positivamente en la accesibilidad, la cohesión territorial y la calidad de vida de la población usuaria (Ortúzar & Willumsen, 2011).

En síntesis, los resultados de la Tabla 3 confirman que la intervención propuesta permite transitar de un nivel de servicio insuficiente a uno funcionalmente aceptable, siempre

que las mejoras operativas se articulen con medidas de seguridad vial coherentes con la realidad multimodal del tramo. Esta evidencia refuerza la pertinencia técnica del proyecto y su alineación con enfoques contemporáneos de diseño y gestión de carreteras rurales.

Tabla 4

Evaluación comparativa de alternativas de pavimento

Criterio	Pavimento flexible	Pavimento rígido (losas cortas)	Discusión
Costo inicial	Menor	Mayor	La diferencia inicial se compensa en el largo plazo
Vida útil	Media	Alta	Favorece sostenibilidad técnica
Mantenimiento	Frecuente	Bajo	Reduce costos operativos
Costo del ciclo de vida	Alto	Bajo	Justifica selección del pavimento rígido

Nota. El pavimento rígido, pese a su mayor costo inicial, resulta más eficiente en el ciclo de vida por su durabilidad y bajo mantenimiento.

La evaluación comparativa de las alternativas de pavimento para el tramo vial La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo evidencia diferencias sustantivas en términos de desempeño estructural, requerimientos de mantenimiento y costos a lo largo del ciclo de vida. Los resultados muestran que, si bien el pavimento flexible presenta una ventaja inicial en términos de costo de construcción, su desempeño se ve condicionado por una menor vida útil y una mayor frecuencia de intervenciones de mantenimiento, particularmente en contextos donde el control del drenaje y la gestión rutinaria no son óptimos. En contraste, el pavimento rígido de concreto hidráulico con losas cortas exhibe un mayor costo inicial, pero ofrece mejor resistencia a cargas repetitivas, mayor durabilidad y menores requerimientos de mantenimiento a lo largo del tiempo.

Desde la perspectiva de la ingeniería de pavimentos, estos resultados son coherentes con la literatura que subraya la importancia del análisis del costo del ciclo de vida (Life-Cycle Cost Analysis, LCCA) como criterio central para la selección de alternativas estructurales. Estudios comparativos en carreteras de bajo y mediano volumen han demostrado que las soluciones basadas exclusivamente en el menor costo inicial tienden a generar mayores gastos acumulados debido a intervenciones frecuentes, interrupciones del servicio y

deterioro acelerado, especialmente bajo condiciones de tránsito mixto y exposición a humedad (Embacher & Snyder, 2001). En este sentido, la Tabla 4 confirma que la alternativa de pavimento rígido resulta más eficiente cuando se consideran horizontes de evaluación de mediano y largo plazo.

La resistencia estructural del pavimento rígido constituye un factor determinante en el contexto del tramo estudiado, donde se registra tránsito de carga asociado a la producción agropecuaria local. La capacidad del concreto hidráulico para distribuir cargas sobre un área mayor reduce la acumulación de deformaciones permanentes y minimiza la aparición de fallas estructurales, en comparación con pavimentos flexibles más sensibles a variaciones de temperatura, humedad y repetición de cargas. Esta ventaja técnica ha sido ampliamente documentada en manuales y estudios de desempeño de pavimentos, que señalan al concreto como una alternativa particularmente adecuada en corredores rurales con mantenimiento limitado (American Concrete Institute [ACI], 2019).

Un aspecto clave que emerge de la discusión es la relación entre el desempeño del pavimento y el drenaje. La literatura especializada enfatiza que, independientemente del tipo de estructura seleccionada, el control del agua constituye una condición necesaria para garantizar la vida útil proyectada. Sin embargo, diversos estudios indican que los pavimentos rígidos presentan una mayor tolerancia relativa a condiciones de humedad, siempre que se acompañen de un diseño hidráulico adecuado, lo que refuerza su idoneidad en tramos donde históricamente se han identificado deficiencias de drenaje (Otto et al., 2020). Por tanto, la selección del pavimento rígido en la Tabla 4 no debe interpretarse de forma aislada, sino como parte de una estrategia integral que articula estructura y drenaje.

Desde una perspectiva de gestión pública y sostenibilidad financiera, los resultados de la Tabla 4 adquieren especial relevancia. En contextos institucionales donde los recursos para mantenimiento son limitados y las intervenciones suelen ser reactivas, optar por soluciones con menor demanda de conservación reduce el riesgo de degradación temprana y contribuye a la estabilidad presupuestaria. Investigaciones sobre prácticas de LCCA en agencias de transporte demuestran que la incorporación sistemática de análisis de ciclo de vida mejora la eficiencia en la asignación de recursos y favorece decisiones de inversión más robustas (Chan et al., 2008).

En síntesis, los resultados de la Tabla 4 permiten concluir que, aunque el pavimento flexible ofrece ventajas en términos de inversión inicial, el pavimento rígido de losas cortas se posiciona como la alternativa más adecuada para el tramo La Paz Carazo – San Pedro –

Niquinohomo cuando se consideran criterios de durabilidad, desempeño estructural, costos de mantenimiento y sostenibilidad a lo largo del ciclo de vida. Esta conclusión refuerza la coherencia técnica del diseño propuesto y su alineación con enfoques contemporáneos de planificación vial orientados a la eficiencia y resiliencia de la infraestructura.

Tabla 5

Impactos ambientales y sociales del proyecto

Dimensión	Impacto identificado	Tipo	Discusión
Ambiental	Emisión de polvo en construcción	Negativo temporal	Mitigable mediante buenas prácticas
Ambiental	Alteración del drenaje natural	Negativo mitigable	Requiere obras hidráulicas adecuadas
Social	Mejora de accesibilidad	Positivo permanente	Favorece integración territorial
Social	Reducción de tiempos de viaje	Positivo permanente	Incrementa productividad y acceso a servicios

Nota. Los impactos negativos son temporales o mitigables, mientras que los beneficios sociales son permanentes y significativos.

La evaluación de los impactos ambientales y sociales asociados al proyecto de mejoramiento del tramo vial La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo evidencia un balance claramente favorable, en el que los efectos negativos identificados se concentran principalmente en la fase de construcción y presentan un carácter temporal y mitigable, mientras que los impactos positivos se manifiestan de forma permanente durante la fase de operación, con incidencia directa en la calidad de vida y el desarrollo territorial de las comunidades del área de influencia.

Desde el punto de vista ambiental, los resultados indican que los principales impactos negativos corresponden a la emisión de polvo, el ruido temporal y la alteración del drenaje superficial durante las actividades constructivas. Estos efectos son comunes en proyectos de infraestructura vial y, según la literatura especializada, pueden ser gestionados eficazmente mediante la aplicación de buenas prácticas ambientales, tales como el control de partículas, la programación adecuada de actividades y el diseño e implementación de sistemas de drenaje funcionales (World Bank, 2019).

En el caso del tramo estudiado, la identificación temprana de estos impactos permite establecer medidas de mitigación específicas que reducen significativamente su magnitud y duración.

Un aspecto crítico dentro de la dimensión ambiental es la gestión del agua y del drenaje, dado que la intervención vial puede modificar patrones de escorrentía y afectar suelos y áreas adyacentes. La evidencia empírica demuestra que una planificación inadecuada del drenaje en carreteras rurales no solo genera impactos ambientales negativos, sino que también compromete el desempeño estructural de la vía y eleva los costos de mantenimiento (Otto et al., 2020). En este sentido, los resultados de la Tabla 5 refuerzan la necesidad de integrar el componente ambiental al diseño hidráulico del proyecto, garantizando que las obras de drenaje cumplan una doble función: mitigación ambiental y sostenibilidad técnica de la infraestructura.

En la dimensión social, los resultados muestran impactos positivos significativos y de carácter permanente, asociados principalmente a la mejora de la accesibilidad, la reducción de los tiempos de viaje y el fortalecimiento de la conectividad intermunicipal. Estos beneficios inciden directamente en el acceso a servicios básicos como educación, salud y mercados, especialmente para poblaciones rurales que dependen del camino como principal medio de conexión. Estudios sobre infraestructura y desarrollo territorial destacan que la mejora de caminos rurales constituye un factor clave para la inclusión social y la dinamización económica local, siempre que se diseñe con un enfoque integral y participativo (World Bank, 2019).

La reducción de los tiempos de viaje identificada como impacto positivo tiene implicaciones sociales que trascienden la eficiencia del transporte. Desde una perspectiva de equidad, menores tiempos y costos de desplazamiento facilitan el acceso de los hogares rurales a oportunidades productivas y servicios esenciales, contribuyendo a la reducción de desigualdades territoriales. La literatura sobre planificación del transporte y justicia social subraya que estos beneficios son particularmente relevantes para grupos vulnerables, quienes suelen experimentar de manera desproporcionada las limitaciones de infraestructura deficiente (Litman, 2021).

Asimismo, la mejora de la infraestructura vial genera efectos indirectos en la seguridad vial y la percepción de bienestar comunitario. Un camino con mejores condiciones geométricas, drenaje adecuado y señalización funcional reduce la incertidumbre y el estrés asociados a la movilidad cotidiana, lo que se traduce en una experiencia de viaje más segura y confortable.

Desde el enfoque de Sistema Seguro, estos beneficios sociales se potencian cuando la intervención incorpora medidas explícitas de protección para usuarios vulnerables, evitando que la mejora de la accesibilidad derive en un aumento del riesgo por incrementos no controlados de velocidad (World Health Organization [WHO], 2017).

En términos de evaluación integral, los resultados de la Tabla 5 confirman que los impactos positivos del proyecto superan ampliamente los efectos negativos, siempre que se implementen de manera rigurosa las medidas de mitigación ambiental previstas y se mantenga una gestión social adecuada durante la ejecución. Esta relación favorable entre beneficios y costos ambientales y sociales refuerza la viabilidad del proyecto desde una perspectiva de sostenibilidad, alineándolo con los principios contemporáneos de desarrollo de infraestructura responsable y con las buenas prácticas internacionales en proyectos viales rurales.

Tabla 6

Resultados del análisis económico del proyecto

Indicador	Resultado	Discusión
Valor Actual Neto (VAN)	Positivo	El proyecto genera beneficios netos
Tasa Interna de Retorno (TIR)	Superior a la tasa social	Inversión pública viable
Escenario con proyecto	Favorable	Justifica técnica y económicamente la intervención

Nota. Los indicadores económicos confirman la viabilidad del proyecto y respaldan su ejecución.

El análisis económico del proyecto de mejoramiento del tramo vial La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo evidencia una viabilidad económica sólida, sustentada en indicadores positivos de rentabilidad social. Los resultados muestran un Valor Actual Neto (VAN) positivo y una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior a la tasa social de descuento, lo que confirma que los beneficios generados por la intervención superan los costos de inversión, operación y mantenimiento a lo largo del horizonte de evaluación. Estos hallazgos indican que la alternativa con proyecto constituye una asignación eficiente de recursos públicos frente al escenario sin proyecto.

Desde la teoría de la evaluación de proyectos, un VAN positivo implica que, al actualizar los flujos de beneficios y costos al valor presente, la sociedad obtiene una ganancia neta asociada

a la inversión. En proyectos viales, estos beneficios suelen materializarse en reducción de tiempos de viaje, disminución de costos de operación vehicular, mejoras en la confiabilidad del transporte y mayor accesibilidad a servicios y mercados. La literatura especializada reconoce estos componentes como pilares del análisis costo-beneficio en infraestructura de transporte, particularmente en corredores rurales donde los efectos de conectividad tienen impactos multiplicadores sobre la economía local (Boardman et al., 2018).

La TIR superior a la tasa social de descuento refuerza la conclusión de viabilidad económica, ya que indica que el rendimiento del proyecto excede el costo de oportunidad del capital público. Este resultado adquiere especial relevancia en contextos de restricción presupuestaria, donde la priorización de inversiones debe orientarse hacia proyectos con mayor retorno social. Estudios metodológicos sobre evaluación económica de infraestructura destacan que la TIR, utilizada de manera complementaria al VAN, permite evaluar la robustez del proyecto frente a variaciones en supuestos clave, como el crecimiento del tráfico o los costos de mantenimiento (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Un aspecto central de la discusión económica es la coherencia entre los resultados financieros y las decisiones técnicas adoptadas, particularmente la selección del tipo de pavimento y la incorporación de mejoras en drenaje y seguridad vial. La evidencia empírica demuestra que alternativas con menor costo del ciclo de vida, como el pavimento rígido seleccionado, tienden a mejorar los indicadores económicos al reducir gastos recurrentes de mantenimiento y minimizar interrupciones del servicio. Investigaciones sobre análisis de ciclo de vida aplicadas a carreteras de bajo volumen confirman que estas decisiones técnicas inciden de forma directa en la mejora del VAN y la estabilidad de los flujos de beneficios a largo plazo (Embacher & Snyder, 2001).

Asimismo, los resultados económicos deben interpretarse a la luz de los beneficios sociales no monetarios, que, aunque difíciles de cuantificar con precisión, fortalecen la justificación del proyecto. Entre estos se incluyen la mejora de la seguridad vial, la reducción de la vulnerabilidad de usuarios no motorizados y el fortalecimiento de la cohesión territorial. La literatura sobre evaluación de proyectos públicos subraya que, en contextos rurales, estos beneficios intangibles suelen estar subrepresentados en los análisis económicos tradicionales, por lo que un VAN positivo adquiere aún mayor relevancia al considerar el conjunto de impactos del proyecto (Boardman et al., 2018).

Desde una perspectiva de política pública, los resultados de la Tabla 6 sugieren que la no ejecución del proyecto implicaría costos de oportunidad significativos, asociados

a la persistencia de una infraestructura deficiente, mayores costos de transporte y una menor competitividad territorial. En contraste, la ejecución del proyecto no solo resulta económicamente viable, sino que se alinea con objetivos más amplios de desarrollo sostenible, al mejorar la eficiencia del sistema de transporte y facilitar el acceso equitativo a oportunidades económicas y sociales. Esta interpretación es consistente con enfoques contemporáneos de planificación de infraestructura que integran eficiencia económica, equidad social y sostenibilidad territorial (World Bank, 2019).

En síntesis, los resultados del análisis económico confirman que el proyecto de mejoramiento del tramo La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo constituye una inversión pública socialmente rentable, coherente con las decisiones técnicas adoptadas y con los beneficios ambientales y sociales identificados. La convergencia entre viabilidad económica, pertinencia técnica y contribución al desarrollo territorial refuerza la solidez integral del proyecto y su idoneidad para la toma de decisiones a nivel institucional.

CONCLUSIONES

Conclusiones integradas del estudio de diseño vial y evaluación de prefactibilidad del tramo La Paz Carazo – San Pedro – Niquinohomo:

1. La problemática del tramo vial es de carácter estructural y sistémico, ya que se evidencian deficiencias concurrentes en la sección transversal, la consistencia geométrica, el drenaje superficial y la legibilidad vial. Estas condiciones no responden a fallas aisladas, sino a un deterioro integral del sistema vial, por lo que las intervenciones superficiales o de mantenimiento rutinario resultan insuficientes para garantizar su adecuada funcionalidad y seguridad.
2. El análisis del tránsito muestra una condición de flujo mixto, con predominio de motocicletas y vehículos livianos, presencia constante de transporte de carga y alta interacción con peatones y ciclistas. Esta composición modal incrementa la complejidad operativa del corredor y evidencia la necesidad de un diseño vial inclusivo que priorice la protección de los usuarios más vulnerables.
3. La comparación de escenarios de nivel de servicio indica que, en condición sin proyecto, la vía presenta un desempeño bajo asociado a maniobras riesgosas, congestión y tiempos de viaje elevados. En contraste, el escenario con proyecto mejora la fluidez y la seguridad operativa, aunque este beneficio depende de la implementación de medidas complementarias de control de velocidad, señalización y diseño seguro.

4. La evaluación de alternativas de pavimento demuestra que, aunque el pavimento flexible presenta menores costos iniciales, el pavimento rígido de losas cortas ofrece mejores condiciones de desempeño en términos de vida útil, resistencia estructural y menores requerimientos de mantenimiento. Esto lo convierte en una alternativa más eficiente desde la perspectiva del costo del ciclo de vida, especialmente en un contexto de tránsito de carga.

5. En el análisis de impactos ambientales y sociales, se identifican efectos ambientales negativos como la emisión de polvo durante la construcción y la posible alteración del drenaje natural, los cuales son temporales y mitigables mediante buenas prácticas constructivas y obras hidráulicas adecuadas. En contraste, los impactos sociales positivos, como la mejora de la accesibilidad y la reducción de tiempos de viaje, son permanentes y contribuyen al fortalecimiento de la conectividad territorial y la calidad de vida.

6. Los resultados del análisis económico evidencian un Valor Actual Neto positivo y una Tasa Interna de Retorno superior a la tasa social de descuento, lo que confirma la viabilidad del proyecto desde el punto de vista de la inversión pública y su rentabilidad social, al generar beneficios netos para la sociedad.

7. En conjunto, la integración de los aspectos técnicos, operativos, ambientales, sociales y económicos permite concluir que el proyecto de mejoramiento del tramo vial constituye una intervención estructural integral orientada no solo a la mejora de la infraestructura, sino también al fortalecimiento de la conectividad, la seguridad vial y el desarrollo territorial de su área de influencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. (2011). A policy on geometric design of highways and streets (6th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials. <https://www.transportation.org>

American Concrete Institute. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19). ACI. <https://www.concrete.org>

Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2018). Cost-benefit analysis: Concepts and practice (5th ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108235594>

- Chan, A. E., Keoleian, G. A., & Gabler, E. (2008). Evaluation of life-cycle cost analysis practices used by the Michigan Department of Transportation. *Journal of Transportation Engineering*, 134(6), 236–245. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2008\)134:6\(236\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:6(236))
- Chaudhari, P. M., Maurya, A. K., & Chandra, S. (2022). Design consistency evaluation of two-lane rural highways: A review of approaches and applications. *IATSS Research*. (PDF disponible en ScienceDirect).
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications. <https://us.sagepub.com>
- Denzin, N. K. (2012). Triangulation 2.0. *Journal of Mixed Methods Research*, 6(2), 80–88. <https://doi.org/10.1177/1558689812437186>
- Elvik, R. (2023). Safety of horizontal curves on rural two-lane roads in Norway. *Traffic Safety Research*. <https://tsr.international/TSR/article/view/25044>
- Embacher, R. A., & Snyder, M. B. (2001). Life-cycle cost comparison of asphalt and concrete pavements on low-volume roads: Case study comparisons. *Transportation Research Record*, 1749(1), 28–37. <https://doi.org/10.3141/1749-05>
- Gooch, J. P., Gayah, V. V., & Donnell, E. T. (2016). Quantifying the safety effects of horizontal curves on two-way, two-lane rural roads. *Accident Analysis & Prevention*, 92, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.03.006>
- Gray, D. E. (2018). *Doing research in the real world* (4th ed.). SAGE Publications. <https://uk.sagepub.com>
- Gross, F., et al. (2009). Safety evaluation of lane and shoulder width combinations on rural, two-lane, undivided roads (FHWA pooled fund study). U.S. Department of Transportation. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/816>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education. <https://www.mheducation.com>
- Khan, M. N., & Das, S. (2024). Advancing traffic safety through the safe system approach: A systematic review. *Accident Analysis & Prevention*, 197, 107518. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107518>
- Kvale, S., & Brinkmann, S. (2015). *InterViews: Learning the craft of qualitative research interviewing* (3rd ed.). SAGE Publications. <https://us.sagepub.com>

- Litman, T. (2021). Evaluating transportation equity: Guidance for incorporating distributional impacts in transportation planning. Victoria Transport Policy Institute. <https://www.vtpi.org>
- Ng, J. C. W., & Sayed, T. (2004). Effect of geometric design consistency on road safety. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 218–227. <https://doi.org/10.1139/l03-090>
- Ortúzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport* (4th ed.). John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119993308>
- Otto, A., Rolt, J., & Mukura, K. (2020). The impact of drainage on the performance of low volume sealed roads. *Sustainability*, 12(15), 6101. <https://doi.org/10.3390/su12156101>
- Pokorny, P., et al. (2020). Safety effects of traffic lane and shoulder widths on rural two-lane undivided roads. *Accident Analysis & Prevention*, 144, 105644. (Artículo en ScienceDirect).
- Transportation Research Board. (2016). *Highway Capacity Manual: A guide for multimodal mobility analysis* (6th ed.). National Academies of Sciences. <https://www.trb.org/Main/Blurbs/175169.aspx>
- World Bank. (2019). *Environmental and social framework*. World Bank Group. <https://www.worldbank.org>
- World Health Organization. (2017). *Managing speed* (WHO/NMH/NVI/17.7). <https://www.who.int/publications/i/item/managing-speed>
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications. <https://us.sagepub.com>