ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.592

Comparative Evaluation of Sustainability Models in Pavement Infrastructure: A Reference Model for the Peruvian Highlands

Montañez Tupayachi, Américo, Mg[1] Chavarry Vallejos, Carlos Magno, Dr[2]
Loayza Lozano, Prysila Abilen, Mg[3] Solís Tito, José Carlos, Mg[4] García Arévalo, Edwar Mg[5]
Vences Martínez, Edwin Omar, Dr[6] Salome Ochoa, Yudith Guillermina, Mg[7]

[1,4]Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Perú,
americo.montanez@unsaac.edu.pe;Jose.solis@unsaac.edu.pe
[2]Universidad Ricardo Palma, Perú, *carlos.chavarry@urp.edu.pe*
[3,7]Universidad Nacional Federico Villareal, Perú, *prysila36@gmail.com;2022032144@unfv.edu.pe*
[5]Universidad Cesar Vallejo, Perú, ggarciaar25@ucvvirtual.edu.pe
[6]Universidad Nacional de Piura, Perú, evencesm@unp.edu.pe

Abstract - A current challenge in civil engineering is that infrastructure projects are sustainable throughout their life cycle, thus contributing to the sustainable development of the country. Peru is a country where economic investments in road infrastructure projects are increasing more and more, so there is a challenge to integrate sustainability into pavement infrastructure projects. Currently, Peru lacks a model that evaluates the sustainability of pavement infrastructure projects in its mountainous areas, whose temperatures are extreme and with intense rainfall due to its altitude and rugged topography. The objective of this research is to select a reference evaluation model, based on a comparative documentary analysis of three existing sustainability evaluation models that are applied to pavements in the different phases of their life cycle and to carry out a critical analysis of the reference model focusing on its capacity to evaluate pavement infrastructure projects in a context such as the Peruvian mountainous areas. The method used is deductive, with a qualitative approach, descriptive level, framed in a non-experimental, documentary, transversal design. In the research, a comparative analysis of three certified sustainability assessment models such as CEEQUAL, IS RATING SCHEME and GREENROADS was carried out throughout the life cycle phases and in various dimensions and key indicators. As a reference model, it was determined that the GREENROADS model is the most suitable to evaluate the sustainability of pavement infrastructure with conditions in the mountains of Peru, given its technical and specialized approach to pavements and its comprehensive sustainability assessment in extreme conditions.

Keywords: Sustainability assessment, pavement infrastructure, life cycle, comparative analysis, reference model.

Evaluación comparativa de modelos de sostenibilidad en infraestructura de pavimentos: Un modelo de referencia para la Sierra Peruana

Montañez Tupayachi, Américo, Mg[1] Chavarry Vallejos, Carlos Magno, Dr[2]
Loayza Lozano, Prysila Abilen, Mg[3] Solís Tito, José Carlos, Mg[4] García Arévalo, Edwar Mg[5]
Vences Martínez, Edwin Omar, Dr[6] Salome Ochoa, Yudith Guillermina, Mg[7]

[1,4]Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Perú,
americo.montanez@unsaac.edu.pe;Jose.solis@unsaac.edu.pe
[2]Universidad Ricardo Palma, Perú, *carlos.chavarry@urp.edu.pe*
[3,7]Universidad Nacional Federico Villareal, Perú, *prysila36@gmail.com;2022032144@unfv.edu.pe*
[5]Universidad Cesar Vallejo, Perú, ggarciaar25@ucvvirtual.edu.pe
[6]Universidad Nacional de Piura, Perú, evencesm@unp.edu.pe

Resumen - ***Un desafío actual de la ingeniería civil es que los proyectos de infraestructuras sean sostenibles en todo su ciclo de vida, de esta manera se estará contribuyendo con un desarrollo sostenible del País. El Perú es un país donde las inversiones económicas de los proyectos de infraestructura viales se incrementan cada vez más, por lo que hay un reto de integrar la sostenibilidad en los proyectos de Infraestructura de pavimentos. Actualmente el Perú, carece de un modelo que evalúe la sostenibilidad de proyectos de infraestructuras de pavimentos en su serranía, cuyas temperaturas son extremas y con precipitaciones pluviales intensas debido a su altitud y topografía accidentada. El objetivo de esta investigación es seleccionar un modelo de evaluación de referencia, a partir del análisis documental comparativo de tres modelos de evaluación de sostenibilidad existentes que se aplican a los pavimentos en las diferentes fases de su ciclo de vida y realizar un análisis crítico del modelo de referencia enfocándose en su capacidad para evaluar proyectos de infraestructura de pavimentos en un contexto como la sierra del Perú. El método utilizado es deductivo, con enfoque cualitativo, de nivel descriptivo, enmarcado en un diseño no experimental, documental, transversal. En la investigación se realizó un análisis comparativo de tres modelos certificados de evaluación de sostenibilidad como el CEEQUAL, IS RATING SCHEME y GREENROADS a lo largo de las fases del ciclo de vida y en diversas dimensiones e indicadores clave. Como modelo de referencia se determinó que el modelo GREENROADS es el más adecuado para evaluar la sostenibilidad de infraestructura de pavimentos con condiciones de la sierra del Perú, dado su enfoque técnico y especializado en pavimentos y su evaluación integral de sostenibilidad en condiciones extremas.***

Palabras claves: Evaluación de sostenibilidad, infraestructura de pavimentos, ciclo de vida, análisis comparativo, modelo de referencia.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la sostenibilidad ha cobrado importancia en la infraestructura vial, pero su implementación sigue siendo un desafío en regiones geográficamente complejas como la sierra del Perú. Esta región, también denominada Alto Andina o serranía, se extiende de norte a sur a lo largo del país y presenta una topografía accidentada, con altitudes entre 1,350 y 5,000 m.s.n.m. Su clima varía en función de la altitud, con temperaturas entre -5.5 °C y 20.7 °C, y se caracteriza por un régimen bimodal de precipitaciones, con máximos entre diciembre y marzo [1]. Estas condiciones extremas afectan la durabilidad de las infraestructuras viales y dificultan su sostenibilidad.

Las infraestructuras de pavimentos, esenciales para la conectividad y el desarrollo económico del Perú, presentan grandes desafíos en esta serranía debido a sus condiciones climáticas extremas, topografía accidental y altitud elevada. El transporte eficiente y sostenible en estas zonas no solo mejora la movilidad de las comunidades rurales y áreas urbanas, sino que también facilita el acceso a mercados, servicios básicos y contribuye a un desarrollo socioeconómico más equitativo [2].

El enfoque de sostenibilidad en pavimentos ha evolucionado de considerar únicamente costos y

durabilidad a incluir factores ambientales, sociales y económicos. No obstante, en la sierra del Perú, las condiciones extremas, como las variaciones térmicas y las lluvias intensas, limitan la aplicabilidad de los modelos de evaluación existentes. La ausencia de un modelo específico para este contexto dificulta la toma de decisiones informadas y sostenibles, lo que impacta negativamente en la eficiencia y durabilidad de las infraestructuras viales en la región. Las infraestructuras en zonas altoandinas requieren enfoques específicos para garantizar su sostenibilidad a largo plazo, siendo un vacío evidente en la actual literatura sobre ingeniería de pavimentos en el Perú [2].

Existen diversos modelos internacionales para evaluar la sostenibilidad en infraestructura, los cuales consideran indicadores como emisiones de carbono, consumo energético e impacto social. Sin embargo, su aplicación en la sierra del Perú es limitada, ya que estos modelos fueron diseñados para contextos urbanos o zonas de baja altitud. La adaptación de estos enfoques a regiones de alta montaña sigue siendo un desafío debido a la variabilidad climática y las dificultades geotécnicas propias del terreno. Uno de los principales retos es la falta de adaptabilidad de los modelos de sostenibilidad existentes a contextos geográficos específicos, lo que genera resultados inexactos y poco útiles para la toma de decisiones[3]. Además, el enfoque cuantitativo de muchos modelos ignora factores sociales importantes como la integración comunitaria o la protección de recursos hídricos, que son cruciales en la sierra peruana [4].

En este contexto, es necesario analizar los modelos existentes de evaluación de sostenibilidad y explorar sus posibles áreas de mejora para desarrollar un modelo ajustado a la realidad de la sierra peruana. A pesar de los intentos por abordar este problema, persisten brechas significativas en la literatura y la práctica. Algunos estudios han propuesto marcos generales de evaluación de sostenibilidad para infraestructuras viales, pero la mayoría no toma en cuenta las particularidades del entorno de alta montaña [5]. La falta de criterios específicos y ajustados a estos entornos sigue siendo una barrera para la implementación de infraestructuras que sean verdaderamente sostenibles en esta región. Uno de los intentos más recientes para abordar este vacío ha sido el desarrollo de modelos integrales que combinan indicadores ambientales, sociales y económicos. Sin embargo, estos modelos siguen siendo limitados en su capacidad para adaptarse a los desafíos específicos de las zonas altoandinas. Muchos de los modelos existentes están diseñados para contextos urbanos o rurales en zonas de baja altitud, lo que limita su efectividad cuando se aplican en la sierra. Además, estos modelos no proporcionan recomendaciones prácticas adecuadas para la toma de decisiones en proyectos de pavimentos, donde los desafíos logísticos y geotécnicos son mucho más complejos [6].

El reto de integrar la sostenibilidad en las infraestructuras de pavimentos de la sierra no solo radica en garantizar su durabilidad frente a las fluctuaciones climáticas, sino también en minimizar los impactos ambientales y maximizar los beneficios sociales. Un modelo adecuado de evaluación debe ser capaz de medir de manera integral y precisa los efectos ambientales, sociales y económicos de los proyectos de pavimentos, desde su construcción hasta su mantenimiento [7]. En la actualidad, modelos internacionales, como los desarrollados por Babashamsi realizaron importantes avances en la inclusión de criterios sostenibles, pero siguen siendo insuficientes para un contexto tan específico como el peruano [8]. Si bien el impacto ambiental y social de las infraestructuras ha cobrado relevancia, la literatura científica aún carece de modelos de evaluación de sostenibilidad adaptados a las condiciones extremas de las zonas altoandinas. Esta brecha en el conocimiento impide la implementación de estrategias efectivas para el desarrollo de pavimentos sostenibles en la sierra del Perú. Investigaciones nacionales e internacionales muestran la urgencia de adaptar y mejorar los modelos existentes para hacer frente a los desafíos de regiones como la sierra del Perú, donde la falta de un enfoque específico ha resultado en infraestructuras costosas y con vida útil limitada [9] y [10].

Esta investigación tiene como objetivo encontrar un modelo de referencia para evaluar la sostenibilidad de pavimentos de la sierra peruana, que no solo toma en cuenta las condiciones geográficas y climáticas de esta región, sino que también permite generar recomendaciones prácticas para los tomadores de decisiones.

II. MÉTODO

Esta investigación sigue un enfoque deductivo, ya que parte del análisis de teorías y modelos preexistentes de evaluación de sostenibilidad en pavimentos. Mediante una revisión crítica y comparativa, se identificó un modelo de referencia que se ajusta a las particularidades de la sierra del Perú. El estudio tiene una orientación aplicada, dado que busca desarrollar un modelo útil para la toma de decisiones en proyectos de pavimentación en la sierra del Perú. La relevancia de este enfoque radica en su potencial para mejorar la sostenibilidad de las infraestructuras viales, abordando problemáticas específicas derivadas del entorno geográfico y climático de la región [11]. El enfoque es cualitativo, debido a que el estudio involucra la revisión crítica, exhaustiva de literatura de modelos de sostenibilidad existentes. El nivel de la investigación es descriptivo, porque busca desarrollar un modelo para la evaluación de la sostenibilidad de proyectos de infraestructura de pavimentos en la sierra del Perú, a

partir del análisis de modelos existentes. El diseño de la investigación es de tipo, no experimental, documental y transversal; No experimental porque no manipulas variables independientes, sino que trabajas con datos existentes y observas los fenómenos tal como ocurren, el objetivo es analizar y explicar las relaciones entre los elementos de los modelos de sostenibilidad y no realizar intervenciones directas en los proyectos; Documental debido a que te basas en la revisión y análisis de información existente, como modelos previos de evaluación de sostenibilidad, datos sobre proyectos de infraestructura de pavimentos, indicadores clave de sostenibilidad y literatura especializada, este enfoque permite estructurar un modelo fundamentado en bases teóricas y empíricas ya disponibles; Transversal porque la recopilación de datos ocurre en un momento específico, evaluando las condiciones actuales para desarrollar un modelo que proyecte su aplicabilidad en el ciclo de vida de los pavimentos, aunque el modelo evalúa todo el ciclo de vida, los datos para su desarrollo y validación se obtienen en un único momento. El diseño de estudio incorpora un enfoque de análisis causal, ya que busca identificar los factores que influyen en la sostenibilidad de los proyectos de pavimentos. A través de un análisis comparativo, se determinan las variables con mayor impacto y se fundamenta el modelo propuesto.

El procedimiento de la investigación se basó en una revisión y análisis documental exhaustivo, llevado a cabo en varias etapas. Inicialmente, se realizó una búsqueda sistemática de información en bases de datos académicas reconocidas, incluyendo Scopus, Web of Science, SciELO y Google Scholar, con el propósito de identificar artículos, informes y normativas relevantes sobre sostenibilidad en infraestructuras de pavimentos. Para garantizar la calidad y pertinencia de las fuentes, se establecieron criterios de inclusión y exclusión, priorizando estudios publicados en los últimos diez años, en inglés o español, y en revistas indexadas en Scopus, WoS o SciELO. Se descartaron aquellos documentos que no abordaban específicamente la evaluación de sostenibilidad en pavimentos o que no presentaban suficiente respaldo metodológico. Una vez identificadas las fuentes relevantes, se procedió a su clasificación temática, agrupando los documentos en categorías relacionadas con la sostenibilidad ambiental, económica y social, así como en modelos específicos de evaluación. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis detallado del contenido, centrándose en los indicadores de sostenibilidad empleados, las metodologías de evaluación utilizadas y la aplicabilidad de los modelos en el contexto de la sierra del Perú. A partir de esta evaluación, se realizó una síntesis de la información, identificando las principales fortalezas y debilidades de los modelos revisados, así como sus áreas de mejora. En la fig. 1 se ilustra un esquema que permite una visualización clara y organizada del proceso de análisis documental.

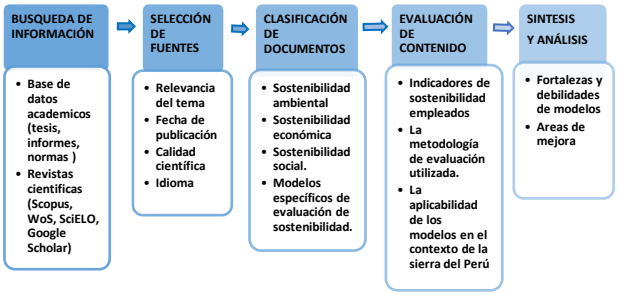


Fig. 1 Proceso del Análisis documental

Con base en los hallazgos del análisis documental, se establecieron criterios de comparación para evaluar la efectividad de los distintos modelos de sostenibilidad. Estos criterios consideraron aspectos como la adaptabilidad a condiciones climáticas extremas, la inclusión de indicadores sociales y económicos, y la viabilidad de implementación en proyectos de pavimentos en regiones de alta montaña. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis comparativo aplicando técnicas cualitativas y cuantitativas. Se utilizaron matrices de comparación y tablas de evaluación para organizar la información de manera sistemática, lo que permitió visualizar diferencias clave entre los modelos. Además, se emplearon técnicas de análisis estadístico descriptivo para sintetizar las características más relevantes y facilitar la interpretación de los resultados.

Finalmente, con base en el análisis comparativo, se identificó un modelo de referencia que presenta el mayor grado de adaptación a las condiciones geográficas, climáticas y socioeconómicas de la sierra del Perú. Este modelo no solo permite una evaluación más precisa de la sostenibilidad de los pavimentos en la región, sino que también proporciona recomendaciones prácticas para la toma de decisiones en proyectos de infraestructura vial.El análisis documental es útil para obtener datos que ya han sido recolectados y sistematizados, lo que facilita su análisis en investigaciones exploratorias y comparativas [12].

III. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados del análisis comparativo de diferentes modelos de evaluación de sostenibilidad aplicados a infraestructuras de pavimentos. Se han seleccionado modelos reconocidos a nivel internacional, los cuales fueron evaluados en función de su país de origen, enfoque geográfico y su capacidad de adaptación a condiciones climáticas extremas como variaciones térmicas y precipitaciones intensas. En la Tabla 1 se resumen las características principales de cada modelo.

TABLA 1
MODELOS CERTIFICADOS DE EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD DE INFRAESTRUCTURAS

Modelo	País de Origen	Enfoque geográfico	Adaptabilidad a Infraestructura de pavimentos	Adaptabilidad a variaciones térmicas	Manejo de precipitaciones pluviales extremas.
CEEQUAL [13]	Reino Unido	Internacional	Alta	Alta	Alta
Envision [14]	EE.UU.	Internacional	Media	Alta	Alta
IS Rating Scheme [15]	Australia	Internacional	Alta	Alta	Alta
BREEAM Infrastructure [16]	Reino Unido	Nacional (Reino Unido)	Media	Media	Alta
LCE4ROADS [17]	Europa	Europa	Alta	Alta	Alta
GREENROADS [18]	EE.UU.	Internacional	Alta	Alta	Alta
GreenLITES [19]	EE.UU.	Nacional (Nueva York)	Alta	Alta	Media
INVEST [20].	EE.UU.	Nacional (Estados Unidos)	Alta	Alta	Alta
GreenPave [21]	Canadá	Nacional (Canadá)	Alta	Alta	Media
STARS [22]	EE.UU.	Nacional (Estados Unidos)	Media	Media	Alta
LEED [23]	EE.UU.	Internacional	Alta	Media	Alta

Modelos seleccionados. Los resultados de la Tabla 1 indican que tres modelos cumplen con los requisitos de adaptación a infraestructuras de pavimentos en condiciones de temperaturas extremas y alta pluviosidad, como en la sierra peruana: CEEQUAL, IS RATING SCHEME y GREENROADS. A continuación, presentamos una descripción de cada modelo:

1. CEEQUAL (Civil Engineering Environmental Quality Assessment and Award Scheme): Año de Implementación 2003. País de Origen: Reino Unido. Enfoque Principal: Calidad ambiental de proyectos de ingeniería civil. Versión Actualizada: v6 (2019). Descripción: CEEQUAL evalúa el rendimiento ambiental y la sostenibilidad en proyectos de ingeniería civil, incluidas las infraestructuras de transporte y pavimentos. Está diseñado para adaptarse a una amplia gama de climas y entornos geográficos, lo que lo convierte en una opción adecuada para condiciones extremas como temperaturas fluctuantes y alta altitud. También evalúa la gestión del agua, lo que es crucial en áreas con precipitaciones intensas. CEEQUAL fomenta la selección de materiales y métodos de construcción que mejoren la durabilidad bajo condiciones difíciles. Justificación: Su versatilidad en la evaluación de proyectos bajo condiciones ambientales complejas lo hace adecuado para pavimentos en altura con temperaturas extremas y alta pluviosidad [24].

2. IS RATING SCHEME (Infrastructure Sustainability Rating Scheme): Año de Implementación: 2012. País de Origen: Australia. Enfoque Principal: Sostenibilidad en infraestructuras. Versión Actualizada: v2.1 (2020). Descripción: El IS Rating Scheme de Australia está diseñado para evaluar la sostenibilidad de infraestructuras, considerando aspectos ambientales, sociales y económicos. Debido a que Australia es un país con condiciones climáticas extremas (desde desiertos hasta regiones de alta pluviosidad), este sistema es altamente efectivo para evaluar proyectos en ambientes severos. Se enfoca en la resiliencia de infraestructuras ante climas extremos y en la eficiencia de recursos hídricos, dos factores críticos para pavimentos en zonas montañosas con altas precipitaciones y variaciones de temperatura. Justificación: Su enfoque en la adaptación climática y la resiliencia frente a fenómenos extremos lo hacen muy adecuado para infraestructuras ubicadas en altitudes elevadas y condiciones climáticas severas [25].

3. GREENROADS: Año de Implementación 2010**.** País de Origen: EE. UU. Enfoque Principal: Sostenibilidad en carreteras y pavimentos. Versión actualizada: v2 (2021). Descripción: El modelo Greenroads fue diseñado específicamente para proyectos de carreteras y pavimentos, con un enfoque en la sostenibilidad y resiliencia en condiciones ambientales adversas. Su metodología prioriza el uso de materiales sostenibles y técnicas que optimizan la gestión de recursos hídricos, un factor clave en regiones con alta pluviosidad. Además, su evaluación de la durabilidad de los pavimentos ante temperaturas extremas lo convierte en una opción adecuada para infraestructuras en zonas de alta montaña. Justificación: Su enfoque en la resiliencia y sostenibilidad de los materiales hace que sea adecuado para pavimentos en altitud y condiciones climáticas extremas [26].

Análisis comparativo de los modelos. El análisis de estos tres modelos sirvió como paso previo a la selección de un modelo de referencia, para lo cual se evaluaron los criterios como: fases evaluación del ciclo de vida un pavimento, numero de categorías y créditos del modelo, rango de puntuación para la medición de sostenibilidad, niveles de reconocimiento del método y pilares de sostenibilidad que se considera. En la tabla 2 se presenta los resultados de este análisis comparativo.

TABLA 2
ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS SELECCIONADOS

CRITERIOS	CEEQUAL (V6)	IS RATING SCHEME (V2.1)	GREENROADS (V2)
Año de actualización	2020	2021	2017
Fases evaluación del ciclo de vida un pavimento	Estrategia, diseño y construcción.	Diseño y construcción.	Diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre
Número de categorías	14 categorías.	6 categorías.	6 categorías.
Número de créditos	215 créditos.	44 créditos.	61 créditos.
Rango de puntuación	0 a 100%.	0 a 100 puntos.	0 a 130 puntos.
Niveles de reconocimiento	Pass: ≥30% Good: ≥45% Very Good: ≥60% Excellent: ≥75% Outstanding: ≥90%	Commended: < de 25 pts. Bronze: 25 - 49 puntos Silver: 50 - 74 puntos Gold: 75 - 100 puntos	Certified: 32-42 pts. Silver: 43-53 pts. Gold: 54-63 pts. Evergreen: ≥64 pts.
Pilares de sostenibilidad	Ambiental, social y económico.	Ambiental, social y económico.	Ambiental, social y económico.
Gestión del Ciclo de Vida	Amplio enfoque en las fases de diseño y operación	Evaluación solida en todas las fases del ciclo de vida.	Amplio enfoque en la fase de diseño, construcción, operación y mantenimiento
Certificación	Certificación rigurosa y detallada	Certificación independiente y completa.	Certificación rigurosa y detallada

Asimismo, se realizó un análisis comparativo entre los 3 modelos a lo largo de las diferentes fases del ciclo de vida de los pavimentos, siendo fundamental considerar diversas dimensiones e indicadores clave. Estas dimensiones nos permitieron evaluar la sostenibilidad y la capacidad de los modelos para adaptarse a las condiciones específicas, como altitudes elevadas, temperaturas extremas y alta pluviosidad. En la Tabla 3, se muestra los resultados del análisis comparativo.

TABLA 3
ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS EN LAS DIFERENTES FASES DEL CICLO DE VIDA

DIMENSIÓN	CEEQUAL	IS Rating Scheme	Greenroads
Impacto Ambiental	Evaluación detallada del uso de recursos y gestión de residuos	Fuerte enfoque en gestión de aguas y uso eficiente de recursos	Enfoque en reciclaje y materiales sostenibles
Resiliencia Climática	Fuerte enfoque en la adaptación a condiciones ambientales diversas	Promueve la resiliencia ante fenómenos climáticos extremos.	Alta resiliencia para pavimentos bajo condiciones externas
Impacto Social	Alta participación de partes interesadas y enfoque social	Considera el bienestar social y la accesibilidad en infraestructuras.	Promueve la seguridad y el bienestar de las comunidades
Eficiencia Económica	Enfoque en reducción de costos operativos y sostenibilidad económica.	eficiencia económica con enfoque en reducción de costos a largo plazo.	Enfoque en reducción de costos operativos y sostenibilidad económica.

Los resultados muestran que CEEQUAL es un modelo con un enfoque ambiental robusto, que incorpora principios de gestión del agua, uso eficiente de recursos y selección de materiales sostenibles. Sin embargo, su aplicación en regiones de alta montaña es limitada, ya que no cuenta con un énfasis específico en pavimentos o en resiliencia climática adaptada a condiciones extremas. Por otro lado, IS RATING SCHEME ha sido diseñado para evaluar la sostenibilidad en una amplia gama de infraestructuras, considerando tanto factores ambientales como económicos y sociales. Su aplicación en Australia, un país con climas extremos le confiere una capacidad de adaptación moderada a las condiciones de la sierra peruana. No obstante, su enfoque generalista limita su precisión en el análisis de pavimentos. Finalmente, GREENROADS destaca por ser el único modelo específicamente desarrollado para la evaluación de sostenibilidad en infraestructura vial y pavimentos. Este modelo incorpora indicadores clave como gestión de materiales reciclados, optimización del consumo energético, durabilidad de los pavimentos y resiliencia frente a fluctuaciones térmicas y precipitaciones extremas. Además, su metodología integral y su compatibilidad con distintos entornos geográficos lo convierten en el modelo más adecuado para la sierra del Perú.

Al realizar el análisis comparativo en las distintas fases del ciclo de vida del pavimento para determinar el modelo de referencia más idóneo, encontramos los siguientes resultados:

Diseño y Planificación: GREENROADS presenta una evaluación integral desde la fase de diseño, incorporando estrategias de sostenibilidad desde la planificación inicial. CEEQUAL enfatiza la calidad ambiental del proyecto, pero su aplicación en pavimentos es menos específica. IS RATING SCHEME otorga importancia a la gestión de recursos, pero su marco de evaluación es más amplio y menos especializado en pavimentos.

Construcción: GREENROADS promueve el uso de materiales reciclados y de alto rendimiento, con un enfoque en la reducción de la huella de carbono. CEEQUAL enfatiza la selección de materiales sostenibles, pero sin un enfoque particular en pavimentos. IS RATING SCHEME incorpora criterios de eficiencia energética, pero sin una metodología específica para infraestructura vial en condiciones extremas.

Operación y Mantenimiento: GREENROADS incluye un monitoreo continuo de la durabilidad del pavimento y su comportamiento frente a factores

climáticos adversos. CEEQUAL y IS RATING SCHEME presentan evaluaciones generales, pero carecen de una metodología detallada para la fase operativa del pavimento.

Final de Vida Útil y Reciclaje: GREENROADS incorpora estrategias para el reciclaje de materiales y la reducción de residuos al final del ciclo de vida del pavimento. CEEQUAL considera prácticas de economía circular, pero sin especificidad en pavimentos. IS RATING SCHEME presenta criterios de gestión de residuos, aunque con menor profundidad técnica para carreteras y pavimentos.

Elección del Modelo de Referencia. Con base en el análisis comparativo, se determinó que GREENROADS es el modelo de referencia más adecuado para la evaluación de la sostenibilidad de infraestructuras de pavimentos en la sierra del Perú. Su especialización en carreteras, su enfoque en materiales sostenibles y resiliencia climática, así como su integración de criterios ambientales, económicos y sociales, lo convierten en la opción más viable para futuras implementaciones en la región. Sin embargo, CEEQUAL e IS RATING SCHEME siguen siendo opciones complementarias, especialmente para proyectos que requieran un enfoque más amplio en sostenibilidad ambiental o integración de factores socioeconómicos en la planificación de infraestructuras.

Resultados Clave de GREENROADS.

Para evaluar la aplicabilidad de GREENROADS, se analizaron 50 proyectos implementados con este modelo en distintos contextos.

En la Tabla 4 se pueden observar los resultados con un desglose general de los indicadores clave para Greenroads.

TABLA 4
RESULTADOS OBTENIDOS POR EL MODELO GREENROADS POR DIMENSIÓN E INDICADOR

Dimensión	Indicador	Resultado Obtenido	Unidad de medida
Impacto Ambiental	Reducción de emisiones de CO_2	Reducción de 30-40 % en emisiones	Gramos de CO_2 por tonelada de pavimento construido
	Gestión de residuos y reciclaje	Uso de hasta el 50 % de materiales reciclados	Porcentaje (%) de materiales reciclados
	Eficiencia en el uso de recursos	Reducción del 25-35 % en uso de recursos naturales	m3 de recursos naturales
	Manejo de aguas pluviales	Captación y reutilización del 20-30 % del agua de lluvia	% de agua de pluvial gestionada o reutilizada
Resiliencia Climática	Resistencia a condiciones extremas	Resistencia a temperaturas de -30°C a 50°C	°C, ciclos de resistencia térmica y fatiga
	Adaptabilidad a variaciones climáticas	Desempeño optimo con deformación menor al 5%	Cambio en las propiedades físicas del pavimento (deformación, espesor)
Durabilidad y longevidad del pavimento	Vida útil del pavimento	15-20 años sin necesidad de mantenimiento significativo	Años de vida útil antes de mantenimiento
Impacto Social	Impacto en la salud y seguridad	0-1 incidentes registrados por año	Número de incidentes por año
	Contribución al bienestar de la comunidad	Mejora en accesibilidad y reducción de ruido en un 30 %	Reducción del ruido en dB, mejora en accesibilidad (% de satisfacción comunitaria)
Eficiencia Económica	Costo a largo plazo	Reducción del 20 % en costo de mantenimiento a largo plazo	USD/kilometro pavimentado (costo inicial y mantenimiento)
	Retorno sobre inversión (ROI)	Relación beneficio-costo favorable, ROI del 1.5-2.00	Relación beneficio-costo valor presente neto (VPN)
Gestión del ciclo de vida	Fase de Diseño	Principios de sostenibilidad integrados desde el inicio	Inclusión de criterios sostenibles (si/no)
	Fase de construcción	Uso de tecnologías sostenibles, reducción del 25 % en consumo energético	uso de energía durante la construcción, consumo de materiales
	Operación y mantenimiento	costos operativos reducidos en un 20-30 %	costo anual de operación y frecuencia de mantenimiento
	Fin de vida útil	50-60 % de materiales reciclados al final del ciclo	Porcentaje (%)de materiales reutilizados

Los resultados del modelo GREENROADS indican que su aplicación en pavimentos en zonas de alta montaña ha generado impactos positivos en indicadores clave como: Reducción del 30-40% en emisiones de CO_2 debido a la optimización de materiales y procesos constructivos. Incremento del 50% en el uso de materiales reciclados, promoviendo prácticas sostenibles en la construcción. Mejora en la resistencia del pavimento ante temperaturas de -30°C a 50°C, lo que demuestra su aplicabilidad en condiciones extremas. Reducción del 20-30% en costos de mantenimiento a largo plazo, lo que refuerza su viabilidad económica. Aumento del 30% en la accesibilidad y reducción del ruido en áreas urbanas y rurales, beneficiando la calidad de vida de las comunidades. Estos hallazgos confirman que GREENROADS no solo es aplicable en el contexto de la sierra peruana, sino que también ofrece una metodología con beneficios concretos en durabilidad, reducción de costos y sostenibilidad ambiental.

IV. DISCUSIÓN

Esta investigación evidencia la necesidad de un modelo de evaluación de sostenibilidad específicamente diseñado para las condiciones geográficas y climáticas de la sierra del Perú. A partir del análisis comparativo de los modelos CEEQUAL, IS RATING SCHEME y GREENROADS, se determinó que este último ofrece la mejor capacidad de adaptación a las particularidades de la región. Su aplicación permitiría mejorar la planificación y ejecución de proyectos de pavimentación, asegurando una infraestructura más resiliente y sostenible. Esto se debe a su enfoque especializado en infraestructuras viales, su capacidad para adaptarse a condiciones climáticas extremas y su evaluación integral de indicadores ambientales, sociales y económicos.

Los hallazgos de este estudio coinciden con investigaciones previas que enfatizan la integración de criterios de sostenibilidad en pavimentos expuestos a climas extremos [8]. Además, estudios como los de [2] han destacado la importancia de adaptar los modelos de sostenibilidad a contextos específicos, evidenciando la insuficiencia de modelos genéricos para la sierra peruana. Estos resultados refuerzan la necesidad de desarrollar metodologías más precisas para evaluar infraestructuras en regiones de alta montaña. Uno de los hallazgos más significativos de este estudio es la evaluación del desempeño de los modelos frente a condiciones climáticas extremas. CEEQUAL e IS RATING SCHEME presentan un enfoque general en la sostenibilidad de infraestructuras, pero carecen de indicadores específicos para evaluar la resistencia de pavimentos a fluctuaciones térmicas extremas y precipitaciones intensas. En contraste, GREENROADS incorpora métricas especializadas en la gestión de aguas pluviales y resiliencia térmica, lo que lo hace más adecuado para su implementación en la sierra peruana.

Por otro lado, el modelo GREENROADS, al estar diseñado exclusivamente para infraestructuras viales, ofrece una metodología de evaluación más precisa y adaptable a las condiciones de la sierra peruana, lo que lo convierte en la opción más viable para su implementación en la región.

Otro hallazgo clave es la evaluación del impacto social y económico de los modelos analizados. GREENROADS incorpora indicadores de accesibilidad y seguridad vial que pueden mejorar significativamente la calidad de vida de las comunidades rurales y urbanas en la sierra. Esto concuerda con estudios previos que destacan la necesidad de modelos que no solo evalúen la sostenibilidad ambiental, sino que también incorporen criterios de equidad social y desarrollo económico a largo plazo.

A pesar de sus ventajas, la aplicación de GREENROADS en el Perú enfrenta desafíos que deben ser abordados. En primer lugar, la normativa nacional aún no contempla criterios específicos para evaluar la sostenibilidad de pavimentos en regiones de alta montaña, lo que exige la adaptación del modelo a la regulación local. Además, su implementación requiere la capacitación de ingenieros y tomadores de decisiones en el uso de metodologías sostenibles. Futuros estudios deberían explorar estrategias para integrar este modelo en el marco regulatorio peruano y evaluar su aplicabilidad mediante estudios de caso en proyectos viales

V. CONCLUSIONES

Esta investigación permitió identificar un modelo de referencia para evaluar la sostenibilidad de pavimentos en la sierra del Perú, considerando las particularidades geográficas y climáticas de la región.

A partir del análisis comparativo de los modelos CEEQUAL, IS RATING SCHEME y GREENROADS, se determinó que GREENROADS es el modelo más adecuado, debido a su enfoque especializado en infraestructura vial, su integración de criterios ambientales, sociales y económicos, y su capacidad para evaluar la resiliencia de los pavimentos ante condiciones extremas de temperatura y pluviosidad.

Los resultados evidencian que la evaluación de la sostenibilidad de pavimentos en la sierra peruana debe abordarse desde un enfoque integral, considerando no solo los aspectos ambientales, sino también factores económicos y sociales. Indicadores como accesibilidad, impacto en la comunidad y costos de mantenimiento a largo plazo son determinantes para garantizar la viabilidad y sostenibilidad de los proyectos en esta región.

Asimismo, el estudio revela que los modelos tradicionales de sostenibilidad, diseñados principalmente para contextos urbanos o de baja altitud, no contemplan adecuadamente las condiciones geográficas y climáticas de la sierra. Por ello, es fundamental adaptar estas metodologías a la realidad local, incorporando criterios específicos que permitan evaluaciones más precisas y aplicables a la toma de decisiones en infraestructura vial.

Para la implementación efectiva de GREENROADS en el Perú, es necesario realizar ajustes normativos y desarrollar capacitación especializada para los actores clave del sector, incluyendo ingenieros, tomadores de decisiones y constructores. Fortalecer la normativa y la formación en sostenibilidad permitirá aplicar este modelo de manera eficiente y contribuirá a la mejora de la infraestructura vial en el país.

Finalmente, esta investigación establece un marco sólido para la evaluación de la sostenibilidad de pavimentos en la sierra del Perú. Sus hallazgos no solo aportan al desarrollo de metodologías más adaptadas a la realidad del país, sino que también promueven la construcción de infraestructura más sostenible, resiliente y alineada con los desafíos climáticos y geotécnicos de la región. Sin embargo, futuras investigaciones deberán profundizar en la validación empírica del modelo seleccionado, considerando estudios de caso y pruebas piloto que permitan su adaptación óptima a la normativa y condiciones locales.

AGRADECIMIENTO

A Dios por iluminarnos y guiarnos en la investigación, a nuestro asesor especialista en el tema y metodólogo que participo en este artículo, la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, a la Escuela Universitaria de Post grado de la Universidad Nacional Federico Villareal que a través de sus docentes compartieron sus conocimientos que contribuyo para el mejor desarrollo del presente artículo.

REFERENCIAS

[1] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2021). CLIMAS DEL PERÚ – mapas de clasificación climática nacional. Agosto 2021. ISBN: 978-612-48315-3-9

[2] González, F., Rojas, A., & Pérez, J. (2019). Sustainable infrastructure in mountainous regions: Challenges and solutions. Journal of Infrastructure Systems, 25(2), 175-182. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000491

[3] Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2019). Creating shared value: How to reinvent capitalism—and unleash a wave of innovation and growth. Harvard Business Review. https://hbr.org/2019/01/creating-shared-value

[4] Spangenberg, J. H. (2020). Indicators for sustainable development: A critical appraisal. Ecological Indicators, 125, 107456. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107456

[5] Finkbeiner, M. (2021). Life cycle sustainability assessment: Methodology and practice. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36921-3

[6] Chouinard, Y., Ellison, J., & Ridgeway, R. (2020). The sustainable economy: Hard truths about climate change and global business. Harvard Business Review.

[7] Fan, G. S., Wei, P., Sun, S., & Li, P. (2015). Research on national sustainability evaluation model. Proceedings of the 2015 International Conference on Logistics, Engineering, Management and Computer Science, 524-529. https://doi.org/10.2991/LEMCS-15.2015.100

[8] Babashamsi, P., Yusoff, N., Ceylan, H., Nor N., & Jenatabadi, H. S. (2016). Sustainable development factors in pavement life cycle: Highway/airport review. Sustainability, 8(3), 248. https://doi.org/10.3390/SU8030248

[9] Zheng, X., Easa, S., Yang, Z., Ji, T., & Jiang, Z. (2019). Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. Journal of Cleaner Production. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.12.227

[10] Finkbeiner, M. (2021). Life cycle sustainability assessment: Methodology and practice. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36921-3

[11] Martínez, J. A., Pérez, M. A., & López, R. (2019). Developing a framework for assessing the sustainability of corporate strategies. Business Strategy and the Environment, 28(3), 1231-1242. https://doi.org/10.1002/bse.2305

[12] Bowen, G. A. (2009). Document analysis as a qualitative research method. Qualitative Research Journal, 9(2), 27-40. https://doi.org/10.3316/QRJ0902027

[13] Institution of Civil Engineers. CEEQUAL - Sustainability Assessment Tool. Londres, UK: ICE; 2023. https://www.ceequal.com

[14] Institute for Sustainable Infrastructure. Envision Sustainability Professional. Washington, DC: ISI; 2023 https://sustainableinfrastructure.org

[15] Infrastructure Sustainability Council. IS Rating Tool. Sydney, Australia: ISC; 2023. https://www.iscouncil.org

[16] Building Research Establishment. BREEAM Infrastructure 2023. Watford, UK: BRE; 2023. https://www.breeam.com

[17] LCE4ROADS Project Consortium. Life Cycle Engineering for Roads. Bruselas, Bélgica: LCE4ROADS; 2023. https://lce4roads.eu

[18] Greenroads Foundation. Greenroads Rating System. Seattle, WA: Greenroads Foundation; 2023. https://greenroads.org

[19] New York State Department of Transportation. GreenLITES Program. Albany, NY: NYSDOT; 2023. https://dot.ny.gov

[20] U.S. Department of Transportation. INVEST - Infrastructure Voluntary Evaluation Sustainability Tool. Washington, DC: USDOT; 2023. https://www.sustainablehighways.org

[21] Ontario Ministry of Transportation. GreenPave Sustainability Rating System. Ontario, Canadá: MTO; 2023. https://ontario.ca

[22] STAR Communities. STAR Community Rating System. Washington, DC: STAR; 2023. https://www.starcommunities.org

[23] U.S. Green Building Council. LEED for Neighborhood Development. Washington, DC: USGBC; 2023. https://www.usgbc.org

[24] CEEQUAL. (2019). CEEQUAL Version 6. CEEQUAL. https://www.ceequal.com/v6

[25] Infrastructure Sustainability Council of Australia. (2020). IS Rating Scheme v2.1. ISCA. https://www.isca.org.au

[26] Greenroads Foundation. (2021). Greenroads v2. Greenroads Foundation. https://www.greenroads.org