

## ***Gemelos digitales para la supervisión y el mantenimiento de infraestructuras viales: Revisión sistemática***

*Digital twins for road infrastructure monitoring and maintenance: A systematic review*

*Gêmeos digitais para monitoramento e manutenção de infraestrutura rodoviária: uma revisão sistemática*

**Edwar García Arévalo**

Ggarciaar25@ucvvirtual.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-6827-2411>

Universidad César Vallejo. Lima, Perú

**Luz Claudia Navarro del Aguila**

navarro16@ucvvirtual.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0003-4622-9495>

Universidad César Vallejo. Lima, Perú

**Andrés Pinedo Delgado**

pdelgadoa16@ucvvirtual.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0001-6760-1052>

Universidad César Vallejo. Lima, Perú

**Diana Alexi Torres Saavedra**

dtorress@ucvvirtual.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0009-1174-8616>

Universidad César Vallejo. Lima, Perú

**Lyta Victoria Torres Bardales**

ltorresba@ucvvirtual.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0001-8136-4962>

Universidad César Vallejo. Lima, Perú

<http://doi.org/10.59659/impulso.v.5i11.136>

Artículo recibido 9 de abril 2025 | Aceptado 16 de mayo 2025 | Publicado 2 de julio 2025

### **RESUMEN**

Los Gemelos Digitales (DT) emergen como una solución tecnológica prometedora para la gestión eficiente y el mantenimiento proactivo de la infraestructura vial. El objetivo del estudio es analizar la literatura científica sobre la aplicación de Gemelos Digitales para el monitoreo y mantenimiento de la infraestructura vial. El enfoque del estudio es cualitativo, bajo una revisión sistemática orientada en la metodología PRISMA. Las bases de datos utilizadas Scopus, Web of Science y Google Scholar. Se analizan 21 estudios publicados del periodo 2020 hasta 2025. Los hallazgos indican un uso predominante de BIM, IoT e Inteligencia Artificial para el monitoreo de condición y detección de daños. Aunque se reportan beneficios en eficiencia y precisión, persisten desafíos en interoperabilidad de datos, costos de implementación y estandarización. Se concluye que, si bien los DT poseen un gran potencial transformador, se requiere mayor investigación en validaciones a gran escala y desarrollo de soluciones estandarizadas para su adopción generalizada.

**Palabras clave:** Digital; Gemelo; Infraestructura; Monitoreo; Vial

### **ABSTRACT**

Digital Twins (DTs) are emerging as a promising technological solution for the efficient management and proactive maintenance of road infrastructure. The objective of this study is to analyze the scientific literature on the application of Digital Twins for road infrastructure monitoring and maintenance. The study's approach is qualitative, based on a systematic review guided by the PRISMA methodology. The databases used are Scopus, Web of Science, and Google Scholar. Twenty-one published studies from 2020 to 2025 are analyzed. The findings indicate a predominant use of BIM, IoT, and Artificial Intelligence for condition monitoring and damage detection. Although benefits in efficiency and accuracy are reported, challenges persist in data interoperability, implementation costs, and standardization. It is concluded that, while DTs have great transformative potential, further research is required in large-scale validations and the development of standardized solutions for their widespread adoption.

**Keywords:** Digital; Twin; Infrastructure; Monitoring; Road

## RESUMO

Gêmeos Digitais (DTs) surgem como uma solução tecnológica promissora para a gestão eficiente e a manutenção proativa da infraestrutura rodoviária. O objetivo deste estudo é analisar a literatura científica sobre a aplicação de Gêmeos Digitais para monitoramento e manutenção de infraestrutura rodoviária. A abordagem do estudo é qualitativa, baseada em uma revisão sistemática guiada pela metodologia PRISMA. As bases de dados utilizadas são Scopus, Web of Science e Google Acadêmico. Vinte e um estudos publicados entre 2020 e 2025 são analisados. Os resultados indicam um uso predominante de BIM, IoT e Inteligência Artificial para monitoramento de condições e detecção de danos. Embora benefícios em eficiência e precisão sejam relatados, persistem desafios na interoperabilidade de dados, custos de implementação e padronização. Conclui-se que, embora os DTs tenham grande potencial transformador, mais pesquisas são necessárias em validações em larga escala e no desenvolvimento de soluções padronizadas para sua ampla adoção.

**Palavras-chave:** Digital; Gêmeo; Infraestrutura; Monitoramento; Rodovia

## INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial constituye un pilar fundamental para el desarrollo socioeconómico global, facilitando el comercio, la movilidad y el acceso a servicios esenciales (Banco de Desarrollo de América Latina [CAF], 2020). No obstante, su gestión y mantenimiento presentan desafíos considerables, asociados al inevitable deterioro estructural, los elevados costos de intervención y la necesidad imperante de garantizar la seguridad de los usuarios y la sostenibilidad de las inversiones a largo plazo.

Diversos autores han destacado que la disponibilidad y calidad de la infraestructura influyen directamente en la productividad, la integración territorial y la competitividad de los países (Rozas y Sánchez, 2004; Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2004). Sin embargo, su gestión y mantenimiento presentan desafíos considerables, asociados al inevitable deterioro estructural, los elevados costos de intervención y la necesidad de garantizar la seguridad de los usuarios y la sostenibilidad de las inversiones a largo plazo (Paterson y Rossigny, 2022).

En el contexto de América Latina, la brecha en la calidad de la infraestructura vial respecto a bloques económicos más desarrollados es evidente, lo que limita el potencial de crecimiento y la integración regional (CAF, 2020; CEPAL, 2004). En estudios recientes, se resalta que países como Perú enfrentan rezagos importantes en indicadores de calidad de infraestructura, especialmente en carreteras, si se compara con la Alianza del Pacífico y la OCDE (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2019, citado en ComexPerú, 2025). Esta situación evidencia la urgencia de optimizar las estrategias de conservación y modernización del sector vial.

En este sentido, la necesidad de mejora se ve acentuada por la presión económica que supone el mantenimiento, tal como lo detallan las notas técnicas sobre la estimación de sus costos (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2021), lo que impulsa la búsqueda de enfoques más eficientes y proactivos.

En este contexto de optimización, los Gemelos Digitales (DT) emergen como un paradigma tecnológico transformador en el ámbito de la ingeniería civil y la gestión de infraestructuras. Un Gemelo Digital puede conceptualizarse como una réplica virtual dinámica de un activo físico, proceso o sistema, que se mantiene sincronizada con su contraparte real mediante un flujo continuo de datos (Evans et al., 2020). Su arquitectura fundamental integra la representación física del activo, un modelo virtual detallado, una robusta conexión de datos bidireccional y capacidades analíticas avanzadas.

Esta integración es posible gracias a la convergencia de tecnologías habilitadoras clave, que incluyen el Internet de las Cosas (IoT) para la captura de datos mediante una red de sensores, el Modelado de Información de Construcción (BIM) para la representación geométrica y semántica, la Inteligencia Artificial (IA) para el análisis predictivo y la toma de decisiones, y la computación en la nube para el almacenamiento y procesamiento de grandes volúmenes de información.

La continua investigación en marcos robustos para la detección de daños en pavimentos (Zhengji et al., 2024) y el uso de tecnologías como redes neuronales convolucionales y vehículos aéreos no tripulados para la identificación de deterioros (Zhu et al., 2022) subrayan el avance hacia componentes tecnológicos que alimentan y potencian la funcionalidad de los DT.

A pesar del creciente interés y el potencial evidente de los DT para revolucionar el monitoreo y mantenimiento de la infraestructura vial, se percibe una necesidad crítica de consolidar y analizar la evidencia científica disponible. Por ello, esta revisión sistemática se enfoca en infraestructuras viales, con especial atención a contextos similares al peruano, para delimitar el alcance y aportar una visión integral y actualizada sobre el tema.

La literatura actual, si bien prolífica en propuestas conceptuales y estudios de caso aislados, carece de una síntesis sistemática que permita comprender a cabalidad el estado del arte de la investigación, identificar las arquitecturas y tecnologías más prometedoras efectivamente implementadas, evaluar los beneficios reales demostrados en contextos operativos y delimitar los desafíos persistentes que frenan una adopción más generalizada. Esta revisión sistemática se justifica, por tanto, en la necesidad de proporcionar una visión panorámica y estructurada que organice el conocimiento actual y oriente futuras investigaciones y desarrollos en este campo emergente.

Consecuentemente, el objetivo principal de esta revisión sistemática es analizar la literatura científica publicada entre el 1 de enero de 2020 y enero 2025, sobre la aplicación de Gemelos Digitales para el monitoreo y mantenimiento de infraestructuras viales, con un enfoque particular en estudios relacionados con infraestructuras de carreteras y autopistas en contextos latinoamericanos, especialmente aquellos comparables al peruano. Este enfoque regional busca aportar resultados relevantes y aplicables a las

condiciones socioeconómicas y técnicas de la región, aunque también se considerarán estudios globales que aporten avances significativos y transferibles.

Para alcanzar este fin, la investigación se guiará por las siguientes preguntas específicas: 1. ¿Cuáles son las principales arquitecturas y tecnologías (sensores, modelos, plataformas de datos, algoritmos de IA) utilizadas en el desarrollo de DT para infraestructura vial? 2. ¿Qué tipos de aplicaciones de monitoreo y mantenimiento (ej., detección de daños, predicción de vida útil, optimización de mantenimiento) se están implementando o investigando mediante DT? 3. ¿Cuáles son los beneficios y resultados clave reportados (ej., precisión, eficiencia, reducción de costos) de utilizar DT en este contexto?

## METODOLOGÍA

Esta investigación adopta un enfoque cualitativo, de tipo revisión sistemática, siguiendo las directrices PRISMA para la identificación, selección y síntesis de la literatura científica relevante sobre Gemelos Digitales aplicados al monitoreo y mantenimiento de infraestructuras viales. Se establecieron criterios de elegibilidad *a priori*, incluyendo artículos revisados por pares publicados entre el 1 de enero de 2020 y enero de 2025, en inglés o español, que abordaran el desarrollo, implementación o evaluación de Gemelos Digitales en activos viales como carreteras, puentes o túneles. Para la búsqueda, se establecieron los siguientes criterios de elegibilidad *a priori*:

Se incluyeron artículos de revistas científicas y actas de congresos revisados por pares que describieran el desarrollo, la implementación o la evaluación de Gemelos Digitales (DT) aplicados al monitoreo, gestión, mantenimiento o evaluación de activos de infraestructura vial, tales como carreteras, puentes o túneles. También se consideraron artículos de revisión si ofrecían una síntesis única y altamente pertinente. Las variables de resultado de interés abarcaron las tecnologías DT específicas, sus arquitecturas, las aplicaciones implementadas, los resultados y beneficios reportados, y los desafíos identificados.

En cuanto a los criterios de exclusión, se consideraron únicamente estudios en idioma inglés o español. Fueron excluidas las publicaciones anteriores a 2020, editoriales, cartas, resúmenes sin texto completo, reseñas de libros, notas cortas, patentes, puramente teóricos sobre DT sin aplicación discernible a infraestructura vial, artículos enfocados solo en una tecnología aislada sin integración en un sistema DT o de monitoreo de activos viales, y aquellos que describieran aplicaciones de DT para manufactura o industria sin una clara transferibilidad al sector de infraestructura civil vial, o que emplearan el término "digital twin" de manera vaga.

La búsqueda de literatura se realizó en las siguientes bases de datos electrónicas primarias: Scopus y Web of Science (Core Collection). Adicionalmente, se consultó Google Scholar como fuente complementaria para ampliar la cobertura y asegurar la identificación de estudios potencialmente relevantes no indexados en las bases primarias; en esta última, se realizó un filtrado exhaustivo mediante la revisión de

los primeros 200 resultados ordenados por relevancia y un cribado más estricto de los títulos y resúmenes. La última búsqueda se efectuó en enero 2021, hasta, enero 2025.

También, se diseñó una estrategia de búsqueda exhaustiva para cada base de datos, combinando términos relacionados con "digital twin" y "virtual representation" con términos específicos de "infraestructura vial" (como "road", "pavement", "highway", "transport infrastructure", "urban infrastructure") y términos asociados a su "gestión y evaluación" (como "monitor", "management", "maintenance", "assessment", "inspection"). Las cadenas de búsqueda específicas fueron las siguientes:

Scopus: TITLE-ABS-KEY (("digital twin\*" OR "virtual representation\*") AND ("road\*" OR "pavement\*" OR "highway\*" OR "transport\* infrastructure" OR "urban infrastructure") AND ("monitor\*" OR "management" OR "maintenance" OR "assessment" OR "inspection")) AND PUBYEAR > 2019

Web of Science (WoS): TS= (("digital twin\*" OR "virtual representation\*") AND ("road\*" OR "pavement\*" OR "highway\*" OR "transport\* infrastructure" OR "urban infrastructure") AND ("monitor\*" OR "management" OR "maintenance" OR "assessment" OR "inspection")) AND PY > 2019

Google Scholar: ("digital twin" OR "virtual representation") AND ("road" OR "pavement" OR "highway" OR "transportation infrastructure" OR "urban infrastructure") AND ("monitoring" OR "management" OR "maintenance" OR "assessment" OR "inspection") since:2020

El proceso de selección de estudios se realizó en varias fases, siguiendo un enfoque estructurado como se recomienda en la investigación gerencial (Sauer y Seuring, 2023). Inicialmente, la búsqueda en las bases de datos identificó un total de 386 registros. Tras la importación de estos registros a un software de gestión de referencias (EndNote X9), se eliminaron 73 duplicados, quedando 313 registros únicos para la fase de cribado. Dos revisores independientes examinaron los títulos y resúmenes de estos 313 registros, excluyendo 258 que no cumplían con los criterios de elegibilidad o eran claramente irrelevantes.

Las discrepancias entre los revisores se resolvieron mediante discusión y consenso, o con la intervención de un tercer revisor cuando fue necesario. Posteriormente, se recuperaron los textos completos de los 55 artículos restantes para una evaluación de elegibilidad más detallada. En esta etapa, dos revisores independientes evaluaron cada artículo contra los criterios de inclusión y exclusión preestablecidos. De estos, 34 informes fueron excluidos, detallándose las razones principales: 15 por no enfocarse en Gemelos Digitales para infraestructura vial, 10 por ser estudios puramente teóricos sin aplicación específica o por un uso vago del término, y 9 por ser tipos de artículos no elegibles (ej., editoriales, resúmenes de conferencia sin texto completo). Finalmente, 21 estudios fueron considerados elegibles y se incluyeron en la síntesis cualitativa de esta revisión sistemática. El proceso de selección de estudios se resume en la Figura 1:

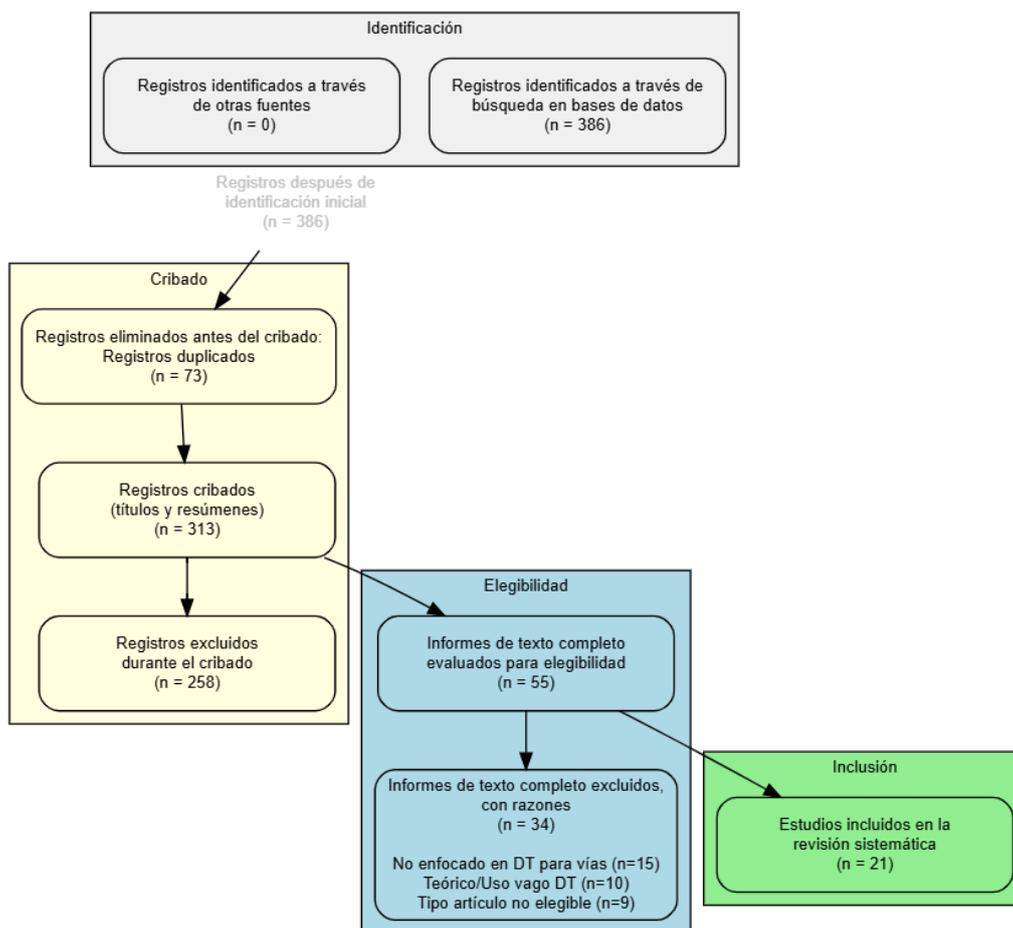


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA

Se diseñó y utilizó un formulario de extracción de datos estandarizado en Microsoft Excel para recopilar la información relevante de cada uno de los 21 estudios incluidos. La extracción de datos fue realizada por dos revisores de forma independiente (H.S.D. y P.S.V.). Cualquier discrepancia en los datos extraídos fue resuelta mediante discusión entre los dos extractores o, si persistía el desacuerdo, mediante la consulta con un tercer miembro del equipo de investigación (L.M.F.V.) para llegar a un consenso.

La extracción de datos se efectuó con un formulario estandarizado, recopilando variables como:

Autor(es) y año de publicación

Título del estudio

País o contexto geográfico del estudio (si se especificaba)

Tipo de infraestructura vial abordada (ej., carretera, puente, túnel, red urbana)

Objetivo principal del estudio

Metodología empleada en el estudio primario (ej., desarrollo de marco conceptual, estudio de caso, diseño experimental, propuesta de prototipo)

Características clave del Gemelo Digital (DT) o su arquitectura

Tecnologías específicas utilizadas (ej., sensores, BIM, IoT, algoritmos de IA/ML/DL, plataformas de datos)

Alcance o aplicación principal del DT (ej., monitoreo de condición, detección de daños, predicción de deterioro, optimización de mantenimiento)

Principales hallazgos o resultados reportados

Limitaciones del estudio según los propios autores

Direcciones futuras de investigación sugeridas por los autores

Nivel de madurez o validación del DT reportado (ej., conceptual, prototipo, piloto, operacional).

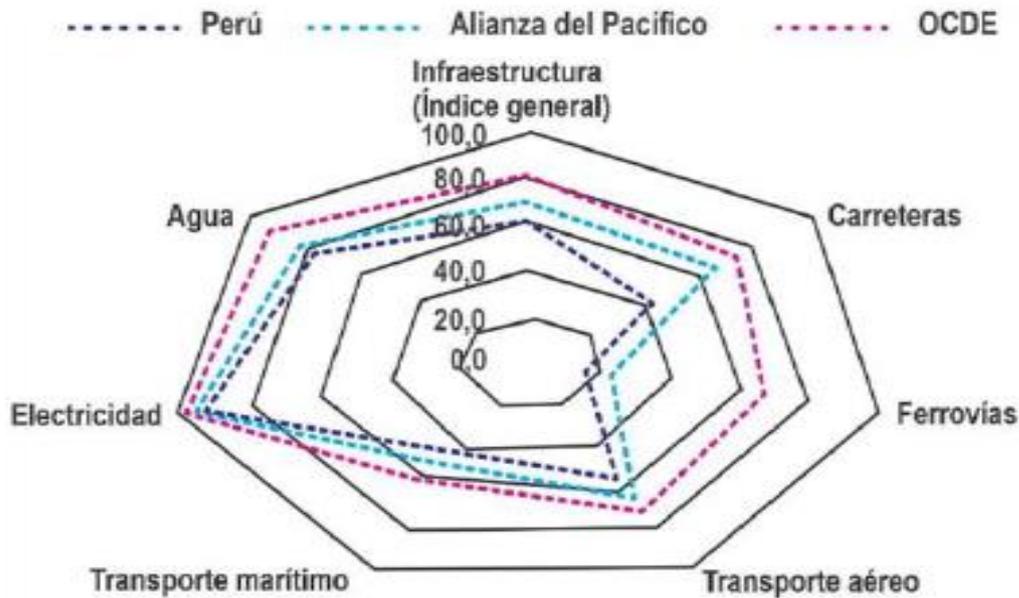
Dada la esperada heterogeneidad en los diseños de las investigaciones incluidas (que abarcan desde propuestas de marcos conceptuales y estudios de caso hasta desarrollos de prototipos y algunas evaluaciones experimentales), se utilizó una lista de verificación de calidad adaptada para evaluar el riesgo de sesgo y la calidad metodológica de cada estudio. Esta lista evaluó aspectos como la claridad de los objetivos del estudio, la descripción detallada de la metodología del DT y su implementación o evaluación, la adecuación de la muestra o caso de estudio, la validez y fiabilidad de los instrumentos o datos utilizados, la idoneidad de los análisis realizados, y el reporte transparente de las limitaciones del estudio. Dos revisores (M.M.C.E. y J.R.J.U.) aplicaron de forma independiente esta lista de verificación a cada estudio incluido, y las discrepancias se resolvieron mediante discusión y consenso. Los resultados de esta evaluación de calidad se presentarán y discutirán en la sección de Resultados.

Finalmente, se planificó una síntesis narrativa de los hallazgos extraídos de los estudios incluidos, agrupándolos temáticamente en función de las preguntas de investigación de esta revisión. Este enfoque es consistente con las metodologías de síntesis cualitativa que buscan generar nuevos constructos interpretativos a partir de la evidencia. Las características detalladas de los estudios incluidos y sus resultados clave se presentarán en formato tabular para facilitar la comparación y el análisis. Debido a la anticipada heterogeneidad significativa en las metodologías específicas de los estudios primarios, las métricas de resultado reportadas y los contextos de aplicación, no se consideró factible ni apropiado realizar un meta-análisis cuantitativo de los datos.

## DESARROLLO Y DISCUSIÓN

En este apartado, se presentan los principales hallazgos derivados del análisis de los 21 estudios incluidos en la revisión sistemática. Se describen las características generales de los estudios, así como las arquitecturas tecnológicas, aplicaciones y beneficios reportados en el uso de gemelos digitales para el monitoreo y mantenimiento de infraestructuras viales.

La situación de la infraestructura en diversas regiones, como ilustra el análisis comparativo de calidad en Perú frente a otros bloques económicos (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2019), evidencia la urgencia de optimizar las estrategias de conservación. A continuación, Figura 1:



**Figura 1.** Indicador de calidad de la infraestructura en Perú comparado con la Alianza del Pacífico y la OCDE (Adaptado de Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2019). Escala del 0 al 100

**Nota:** Esta figura ilustra los desafíos en la calidad de infraestructura en contextos específicos.

La Figura 1, presenta un gráfico radar que compara el índice de calidad de la infraestructura en Perú con el promedio de la Alianza del Pacífico y de los países miembros de la OCDE, considerando distintos sectores: carreteras, ferrovías, transporte aéreo, transporte marítimo, electricidad y agua. La escala utilizada va de 0 a 100, donde 100 representa el nivel óptimo de calidad.

El análisis revela que Perú muestra consistentemente valores inferiores en todos los sectores evaluados en comparación con la Alianza del Pacífico y, especialmente, con la OCDE. Es notable la brecha en el sector de carreteras, donde la diferencia respecto a los estándares de la OCDE es significativa. De igual forma, este patrón se repite en ferrovías y transporte aéreo, evidenciando un rezago estructural que limita la competitividad y la integración logística del país.

En este sentido, la calidad de la infraestructura eléctrica y de agua, aunque presenta mejores indicadores relativos, sigue estando por debajo de los promedios regionales y globales. Estos resultados confirman la necesidad de adoptar estrategias más eficientes y sostenibles para la gestión y el mantenimiento de la infraestructura vial y de servicios públicos en Perú.

La problemática identificada en la calidad y gestión de la infraestructura vial, de manera especial en regiones con brechas significativas como Perú, destaca la necesidad de explorar y sistematizar el

conocimiento sobre tecnologías innovadoras que puedan mejorar el mantenimiento y la supervisión de estos activos críticos. En este contexto, la presente revisión sistemática se enfoca en analizar la literatura científica reciente para comprender cómo los Gemelos Digitales (DT) están siendo aplicados en la gestión vial.

### **Características de los Estudios Incluidos**

Los 21 estudios incluidos en esta revisión sistemática fueron publicados entre enero de 2020 y enero 2025. Estos trabajos se originaron predominantemente en contextos de investigación asiáticos y europeos, con un notable interés en países como China, Corea del Sur, Alemania y Reino Unido, aunque también se identificaron contribuciones de Estados Unidos y estudios con un enfoque global o multirregional.

La mayoría de los estudios se centraron en la aplicación de DT a carreteras y puentes, con un menor número de investigaciones dirigidas a túneles o redes viales urbanas completas. Los diseños metodológicos variaron, incluyendo el desarrollo de marcos conceptuales, estudios de caso para la implementación de prototipos, y algunas evaluaciones experimentales o pilotos de tecnologías DT. Las características detalladas de cada uno de los 21 estudios incluidos se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Características de los estudios incluidos en la revisión sistemática (N = 21)

<b>Autor(es) y Año</b>	<b>Tipo de Infraestructura Vial</b>	<b>Metodología del Estudio Primario</b>	<b>Tecnologías DT Clave Utilizadas</b>	<b>Aplicación Principal del DT</b>	<b>Hallazgos/Resultados Principales Reportados</b>	<b>Limitaciones Clave Reportadas por los Autores</b>	<b>Nivel de Madurez/V alidación del DT</b>
<b>Buuveibaataret al. (2025)</b>	Carreteras, Puentes	Revisión bibliográfica; estudio de caso conceptual	Sensores IoT Sensores móviles (robots, UAVs) BIM Aprendizaje Automático Ontologías	Gestión integral de activos: Monitoreo Evaluación de condición Predicción de deterioro Toma de decisiones Alertas	Propuesta de un marco DT de cinco capas (adquisición, procesamiento, modelado, análisis, UI) contribuyendo a la estandarización.	Falta de validación empírica; naturaleza conceptual; complejidad en integración de datos.	Conceptual
<b>Heise et al. (2024)</b>	Carreteras, Puentes	Desarrollo y validación de prototipo	Neo4j (grafos) Sensores de tráfico Sistemas gestión de puentes (ttSIB, SIB Bauwerke) LandInfra	Consultas complejas integradas para gestión de carreteras y puentes; análisis de datos.	Demostración de viabilidad de un DT basado en grafos para consultas integradas y mejorada gestión de activos viales.	Complejidad en integrar sistemas dispares; transición de 2D a 3D; dependencia de datos existentes.	Prototipo (validado con consultas)
<b>Wu et al. (2025)</b>	Carreteras, Puentes, Túneles	Revisión sistemática	IoT BIM IA Fusión de datos	Monitoreo; mantenimiento predictivo; planificación y operación (ciclo de vida completo).	Propuesta de marco “4H + 4V + N” para DT; identificación de brechas en integración del ciclo de vida.	Calidad de datos; procesamiento en tiempo real; privacidad; falta de estudios integrales sobre ciclo de vida.	N/A (Revisión)
<b>Scolamiero, V.; Boccardo, P. (2025)</b>	Carreteras (infraestructura urbana)	Estudio experimental (piloto) con validación	GNSS IMU LiDAR	Monitoreo en tiempo real; detección de daños; gestión de	Mejora de la eficiencia y precisión del monitoreo urbano;	Escalabilidad a grandes redes; calidad de datos LiDAR en	Piloto Experimental

Autor(es) y Año	Tipo de Infraestructura Vial	Metodología del Estudio Primario	Tecnologías DT Clave Utilizadas	Aplicación Principal del DT	Hallazgos/Resultados Principales Reportados	Limitaciones Clave Reportadas por los Autores	Nivel de Madurez/Validación del DT
Yu et al (2020)	Túneles (pavimentos)	Estudio de caso experimental	Cámaras de alta resolución IA para detección de daños BIM (CityGML) Sensores en túneles XGBoost ANN RF Ridge Regression SVR	activos viales urbanos.  Predicción de deterioro del pavimento; optimización del mantenimiento.	reducción de costos y tiempo de inspección.  Predicciones precisas del rendimiento del pavimento; mejora de la gestión del ciclo de vida del activo.	entornos densos; costos de implementación.  Costos de recolección de datos; complejidad computacional; dependencia de datos específicos del túnel.	Experimental (estudio de caso)
Jiang et al. (2022)	Carreteras (existentes)	Desarrollo de prototipo	Datos de mapas satelitales Técnicas de ajuste de alineación Modelado de secciones transversales	Creación de DT de carreteras antiguas; monitoreo y mantenimiento sin inspecciones costosas.	Permite crear DT de carreteras con datos limitados; reduce costos iniciales de modelado.	Calidad de datos de mapas; defectos en carreteras antiguas no capturados; necesidad de mejorar calidad de entrada.	Prototipo
Consilvio et al. (2023)	Carreteras	Desarrollo de prototipo	Sensores IoT Análisis de datos	Soporte a decisiones para inspección y mantenimiento de pavimentos.	Mejora en la planificación del mantenimiento mediante análisis automatizado.	Escalabilidad y recursos técnicos; prototipo inicial; no reporta eficiencia detallada.	Prototipo

Autor(es) y Año	Tipo de Infraestructura Vial	Metodología del Estudio Primario	Tecnologías DT Clave Utilizadas	Aplicación Principal del DT	Hallazgos/Resultados Principales Reportados	Limitaciones Clave Reportadas por los Autores	Nivel de Madurez/Validación del DT
<b>Buuveibaataret al. (2025)</b>	Carreteras	Revisión bibliográfica; análisis de guías	BIM IoT (conceptual)	Planificación de DT en carreteras; optimización de gestión de infraestructura.	Propuesta de marco conceptual de cinco capas para la planificación de DT en carreteras; guía para mejora de gestión.	Naturaleza teórica; falta de estándares formales en AEC; no reporta variables ni limitaciones metodológicas específicas.	Conceptual
<b>Oditallah et al. (2025)</b>	Pavimentos	Revisión sistemática	IoT IA BIM (revisado)	Predicción y gestión de pavimentos; toma de decisiones mejorada.	Desarrollo de un marco cognitivo para DT en pavimentos; identificación de limitaciones y potencialidades.	Adopción limitada en práctica; falta de estudios prácticos; necesidad de integrar datos heterogéneos.	N/A (Revisión)
<b>Talaghat et al. (2024)</b>	Pavimentos	Revisión sistemática de literatura	Sensores IoT LiDAR IA Modelos basados en física IFC	Monitoreo en tiempo real; mantenimiento proactivo; detección temprana de fisuras.	Síntesis de hallazgos sobre DT en pavimentos; destaca potencial para prácticas proactivas, aunque la investigación es escasa.	Falta de investigación específica; calidad de datos; escalabilidad; necesidad de más casos de uso y algoritmos IA avanzados.	N/A (Revisión)
<b>Sun, Z et al. (2024)</b>	Carreteras, Puentes	Revisión sistemática comprehensiva	IoT Sensores de fibra óptica Modelado BIM	Monitoreo de salud estructural; mantenimiento	Identificación de avances en DT para monitoreo estructural	Calidad de datos; escalabilidad; costos;	N/A (Revisión)

Autor(es) y Año	Tipo de Infraestructura Vial	Metodología del Estudio Primario	Tecnologías DT Clave Utilizadas	Aplicación Principal del DT	Hallazgos/Resultados Principales Reportados	Limitaciones Clave Reportadas por los Autores	Nivel de Madurez/V alidación del DT
Yan et al. (2023)	Carreteras	Revisión sistemática	IA (CNN) CityGML BIM IoT IA	predictivo; detección de daños. Monitoreo y mantenimiento en transporte.	con beneficios en precisión de detección. Identificación de beneficios en la toma de decisiones en gestión de transporte.	interoperabilidad de datos BIM. Falta de estándares; complejidad de integración; necesidad de plataformas unificadas.	N/A (Revisión)
Yu, D.; He, Z. (2022)	Carreteras (y otras infraestructuras)	Revisión sistemática	Sensores IoT IA	Gestión multi-etapa para prevención de desastres y mitigación de riesgos.	Identificación de beneficios en prevención de desastres mediante DT.	Complejidad de integración; falta de estándares; necesidad de integración con sistemas de alerta.	N/A (Revisión)
Zhu et al. (2024)	Pavimentos (superficie vial)	Estudio de caso (piloto)	Sensores (tráfico, clima) Integración de datos en tiempo real	Sistemas de alerta temprana; mantenimiento proactivo para defectos superficiales.	Mejora en eficiencia económica y operativa en gestión de defectos viales específicos.	No reportados explícitamente; contexto específico del caso.	Piloto (estudio de caso)
Fu al. (2023)	Autopistas inteligentes	Desarrollo de marco conceptual	No especificado en detalle (conceptual)	Gestión de tráfico; mantenimiento de autopistas.	Propuesta de marco para operación de DT en autopistas inteligentes; mejora de gestión de tráfico.	No abordado; naturaleza conceptual del marco.	Conceptual

<b>Autor(es) y Año</b>	<b>Tipo de Infraestructura Vial</b>	<b>Metodología del Estudio Primario</b>	<b>Tecnologías DT Clave Utilizadas</b>	<b>Aplicación Principal del DT</b>	<b>Hallazgos/Resultados Principales Reportados</b>	<b>Limitaciones Clave Reportadas por los Autores</b>	<b>Nivel de Madurez/V alidación del DT</b>
<b>Pregolato et al. (2022)</b>	Carreteras (y otras)	Desarrollo conceptual	No especificado en detalle (conceptual)	Mantenimiento y monitoreo de infraestructura existente.	Propuesta de flujo de trabajo “Civil Engineering 4.0” aplicando DT; mejora de gestión de activos.	No reportados explícitamente; enfoque conceptual.	Conceptual
<b>Munasingh y Pasindu (2021)</b>	Carreteras	Plan conceptual/inicial de investigación	Aprendizaje federado Sensores móviles (smartphones)	Mapeo de condiciones viales; identificación de daños.	Diseño de plan inicial para DT vial en contextos con recursos limitados; uso de aprendizaje federado.	Desafíos en implementación práctica; calidad de datos de crowdsourcing; conectividad.	Conceptual (plan)
<b>Meza et al. (2021)</b>	Carreteras (construcción)	Estudio conceptual/investigación	Atributos de sensores Modelo BIM paramétrico Entorno de datos común (CDE) Bexel Manager	Supervisión del rendimiento de carreteras con materias primas alternativas.	Vinculación de datos de sensores a modelo BIM federado; representación codificada por colores.	Aplicabilidad y escalabilidad; robustez del modelo BIM.	Conceptual/ Prototipo temprano
<b>Oreto et al. (2021)</b>	Carreteras (urbanas)	Desarrollo de herramienta con scripts	BIM (Dynamo scripts) Encuestas in-situ Documentación	Programación del mantenimiento; priorización de intervenciones.	Generación de calendario de mantenimiento con curvas de degradación basadas en indicadores BIM codificados por colores.	Precisión de curvas de degradación; integración con sistemas existentes.	Prototipo (herramienta )
<b>Sierra et al. (2022)</b>	Pavimentos	Desarrollo conceptual de DT cognitivo	Imágenes UAV Fotogrametría Procesamiento de imágenes CNN	Monitoreo de salud de pavimentos; detección de deterioro.	Precisión del método comparado con métodos tradicionales.	Extrapolación a otros tipos de pavimentos; necesidad de grandes	Conceptual/ Prototipo temprano

Autor(es) y Año	Tipo de Infraestructura Vial	Metodología del Estudio Primario	Tecnologías DT Clave Utilizadas	Aplicación Principal del DT	Hallazgos/Resultados Principales Reportados	Limitaciones Clave Reportadas por los Autores	Nivel de Madurez/V alidación del DT
<b>Sanfilippo et al. (2022)</b>	Carreteras, Puentes, Infra. civiles	Revisión de perspectiva	Sensores (móviles, robots, UAVs) Redes de datos IA/ML (conceptual)	Vinculación virtual/física; gestión del ciclo de vida; monitoreo continuo; explotación de datos.	Síntesis de conocimientos; énfasis en necesidad de vincular lo virtual y físico; proyección de uso de sensores móviles y UAVs.	conjuntos de datos para entrenamiento. Recogida constante de datos; integración de múltiples fuentes; falta de estandarización.	Conceptual (revisión de perspectiva)

Un análisis general de las características de los estudios incluidos, como se detalla en la Tabla 1, revela una tendencia creciente en la publicación de investigaciones sobre DT para infraestructura vial a partir de 2021. A continuación, se presenta una síntesis de los hallazgos principales extraídos de los 21 estudios incluidos, organizada en atención a las preguntas de investigación de esta revisión.

### **Arquitecturas y tecnologías de DT para infraestructura vial**

Los estudios analizados revelaron una diversidad de arquitecturas para los Gemelos Digitales, siendo comunes los modelos basados en capas que distinguen la adquisición de datos, el procesamiento, el modelado virtual, el análisis y la interfaz de usuario. Varias propuestas enfatizaron arquitecturas centradas en el Modelado de Información de Construcción (BIM) como núcleo para la representación geométrica y semántica, extendidas con capacidades de IoT para la conexión con el activo físico. Las tecnologías de sensores más frecuentemente reportadas incluyeron LiDAR para la captura de nubes de puntos 3D, cámaras (instaladas en vehículos, drones o fijas) para inspección visual y fotogrametría, sensores GPS para geolocalización, y en menor medida, sensores embebidos (acelerómetros, galgas extensométricas) para monitoreo estructural específico.

En cuanto a los modelos virtuales, el BIM fue la tecnología predominante, complementada en algunos casos con modelos de elementos finitos para análisis estructural o modelos basados puramente en datos. Las plataformas de datos y las tecnologías de integración mencionadas abarcaron soluciones basadas en la nube para el almacenamiento y procesamiento, Entornos de Datos Comunes (CDE), el uso de Interfaces de Programación de Aplicaciones (APIs) para la conexión de sistemas, y el desarrollo de ontologías para mejorar la interoperabilidad semántica. Los algoritmos de Inteligencia Artificial (IA) desempeñaron un papel crucial, con un uso extendido de Redes Neuronales Convolucionales (CNN) para la detección y clasificación automática de daños en pavimentos e imágenes, y diversos algoritmos de Aprendizaje Automático (Machine Learning) para la predicción de deterioro, la estimación de vida útil y la optimización de decisiones.

### **Beneficios y resultados clave**

Los estudios incluidos reportaron una serie de beneficios potenciales y resultados clave derivados de la implementación de DT. Entre los beneficios cuantitativos, varios trabajos indicaron mejoras en la precisión de la detección de daños en comparación con métodos manuales tradicionales, con algunos estudios reportando precisiones superiores al 90% para ciertos tipos de defectos.

También se mencionó la reducción potencial en los costos y tiempos de inspección y monitoreo, aunque pocos estudios ofrecieron cuantificaciones detalladas de estos ahorros en contextos operativos a gran escala. Los beneficios cualitativos más frecuentemente destacados incluyeron la mejora en la toma de decisiones gracias a la disponibilidad de información actualizada y contextualizada, una mayor eficiencia en

la planificación del mantenimiento, y la capacidad de realizar un monitoreo continuo y proactivo en lugar de reactivo. Algunos estudios también resaltaron la mejora en la comprensión del comportamiento de los activos y la facilitación de la colaboración entre diferentes actores involucrados en la gestión de la infraestructura.

## Discusión

Los resultados de esta revisión concuerdan y expanden los hallazgos de investigaciones previas, como la revisión de Chang et al. (2024) sobre DT en infraestructura de transporte también identificó la importancia de BIM, IoT e IA como tecnologías habilitadoras clave y señaló desafíos similares en cuanto a interoperabilidad y estandarización. Sin embargo, esta revisión, al enfocarse específicamente en el periodo posterior a 2020 y con una metodología PRISMA explícita sobre 21 estudios, ofrece una granularidad más fina sobre las arquitecturas emergentes y la frecuencia de aplicaciones específicas en el subcampo del monitoreo y mantenimiento vial. Esta especificidad permite mapear con mayor precisión las tecnologías predominantes, los sensores más utilizados y los algoritmos de IA aplicados, así como evidenciar la frecuencia y contexto de uso en carreteras y puentes, áreas que no siempre reciben un tratamiento detallado en revisiones anteriores.

No obstante, mientras Chang et al. (2024) y Sark y Sadhu (2024) destacan el potencial transformador de los DT, nuestra revisión revela que, a pesar de los avances tecnológicos, la adopción práctica aún enfrenta limitaciones significativas. Por ejemplo, la interoperabilidad y estandarización de datos, señaladas como desafíos desde estudios anteriores (Chang et al., 2024; Zheng et al., 2018), persisten como barreras críticas que dificultan la integración eficiente de múltiples fuentes de datos y plataformas. Además, la heterogeneidad metodológica y la escasez de evaluaciones cuantitativas robustas limitan la generalización de resultados y la comparación directa entre estudios, lo que evidencia una brecha importante en la literatura actual.

Una contribución relevante de esta revisión ha sido la identificación de la predominancia del uso del BIM combinado con tecnologías IoT y algoritmos de redes neuronales convolucionales para la detección automatizada de daños, un avance que no se había detallado en revisiones previas. De igual forma, se destaca la tendencia de los modelos predictivos para la estimación de la vida útil y la optimización de mantenimiento, que representan un paso adelante en la transición de enfoques reactivos a proactivos.

Sin embargo, la revisión también evidencia la limitada cuantificación de beneficios económicos y operativos en contextos reales a gran escala, lo que constituye una brecha crítica para justificar inversiones y promover la adopción masiva.

En cuanto a las limitaciones del proceso de revisión, la búsqueda se restringió a estudios en inglés y español, lo que podría haber omitido investigaciones relevantes publicadas en otros idiomas. Aunque se intentó una búsqueda exhaustiva, la literatura gris (como informes técnicos no publicados o tesis no indexadas) no fue sistemáticamente explorada. Finalmente, a pesar del esfuerzo por mantener la objetividad, la interpretación de los datos extraídos y su síntesis narrativa siempre conllevan un grado de subjetividad inherente al juicio de los revisores.

En cuanto a las implicaciones prácticas de estos hallazgos son claras: los profesionales de la ingeniería vial y gestores de activos de infraestructuras deben considerar que los DT ofrecen un potencial relevante para transformar las prácticas actuales de monitoreo y mantenimiento, permitiendo un cambio desde enfoques reactivos hacia estrategias proactivas y predictivas. También, se debe considerar la adopción gradual de tecnologías DT, comenzando con pilotos en activos críticos, para familiarizarse con sus capacidades y desafíos. La integración de BIM con datos de sensores y análisis de IA parece ser una vía prometedora para mejorar la eficiencia en la detección de daños y la planificación de intervenciones.

No obstante, para superar las barreras actuales, es crucial que las organizaciones inviertan en la capacitación de personal y en el desarrollo de infraestructura digital robusta, y que, los responsables de políticas deberían fomentar la creación de estándares y guías que faciliten la interoperabilidad y la adopción de DT, así como promover la colaboración entre la academia, la industria y el sector público para superar los desafíos tecnológicos y económicos.

Finalmente, esta revisión destaca la necesidad urgente de investigaciones futuras que cuantifiquen los beneficios económicos y operativos de los DT en escenarios reales y a gran escala, así como estudios que aborden la estandarización y escalabilidad de estas tecnologías en contextos diversos, particularmente en regiones como América Latina, donde la adopción aún es incipiente.

## CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática proporciona un panorama actualizado y detallado sobre la aplicación de gemelos digitales (DT) en la gestión de infraestructuras viales, evidenciando un avance significativo hacia sistemas de monitoreo inteligentes y proactivos. Si bien el potencial de los DT para optimizar la supervisión y la toma de decisiones es innegable, la madurez tecnológica y la validación empírica en contextos operativos aún son limitadas, lo que señala la necesidad de investigaciones que cuantifiquen beneficios y aborden desafíos como la interoperabilidad y la estandarización.

Entre las contribuciones más relevantes de este estudio incluyen la caracterización precisa de las arquitecturas tecnológicas predominantes, centradas en BIM, IoT e IA, y la identificación de aplicaciones concretas en detección de daños y mantenimiento predictivo. Estas evidencias ofrecen cimientos para las bases

para que profesionales y gestores adopten estrategias graduales de implementación, adaptadas a las condiciones específicas de sus regiones.

Finalmente, esta revisión resalta la importancia de fortalecer la integración entre academia, industria y sector público, así como el desarrollo de políticas que impulsen la estandarización y capacitación, con la finalidad de acelerar la consolidación práctica de los DT y maximizar su impacto en la sostenibilidad y eficiencia de la infraestructura vial.

## REFERENCIAS

- Banco de Desarrollo de América Latina CAF. (2020). Infraestructura en el desarrollo de América Latina: Tendencias, brechas y oportunidades. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1634>
- Buuveibaatar, M., Brilakis, I., Peck, M., Economides, G., y Lee, W. (2025). A Conceptual Framework for Planning Road Digital Twins. *Buildings*, 15(3), 316. <https://doi.org/10.3390/buildings15030316>
- Buuveibaatar, M., Shin, S., y Lee, W. (2025). Digital twin framework for road infrastructure management. *Applied Sciences*, 15(10), 5765. <https://doi.org/10.3390/app15105765>
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2004). La infraestructura en el desarrollo de América Latina. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6376/1/S2004015\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6376/1/S2004015_es.pdf)
- Chang, X., Zhang, R., Mao, J., y Fu, Y. (2024). Digital Twins in Transportation Infrastructure: An Investigation of the Key Enabling Technologies, Applications, and Challenges. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Early Access. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3401716>
- Consilvio, A., Hernández, J. S., Chen, W., Brilakis, I., Bartoccini, L., Di Gennaro, F., y van Welie, M. (2023). Towards a digital twin-based intelligent decision support for road maintenance. *Transportation Research Procedia*, 69, 791-798. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.12.085>
- Evans, S., Saviano, C., Quemaduras, A., y Cooper, C. (2020). Digital Twins for the Built Environment. The IET (Institution of Engineering and Technology). <https://www.theiet.org/impact-society/sectors/built-environment/built-environment-news/2019-news/digital-twins-for-the-built-environment>
- Fu, H., Zhao, T., Chen, Y., Yao, Y., y Leng, J. (2023). Framework and operation of digital twin smart freeway. *IET Intelligent Transport Systems*, 17(3), 620–633. <https://doi.org/10.1049/itr2.12288>
- Heise, I., Esser, S., y Borrmann, A. (2024). Towards a comprehensive digital twin of a road infrastructure system - Requirements analysis and system architecture. *ResearchGate Publication*. [https://www.researchgate.net/publication/382181786\\_Towards\\_a\\_comprehensive\\_digital\\_twin\\_of\\_a\\_road\\_infrastructure\\_system\\_-\\_Requirements\\_analysis\\_and\\_System\\_architecture](https://www.researchgate.net/publication/382181786_Towards_a_comprehensive_digital_twin_of_a_road_infrastructure_system_-_Requirements_analysis_and_System_architecture)
- Jiang, F., Ma, L., Broyd, T., Chen, W., y Luo, H. (2022). Building digital twins of existing highways using map data based on engineering expertise. *Automation in Construction*, 134, 104081. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104081>
- Meza, S., Mauko Pranjić, A., Vezok, R., Osmokrović, I., y Lenart, S. (2021). Digital twins and road construction using secondary raw materials. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, Article 6689189. <https://doi.org/10.1155/2021/6689189>

- Ministerio de Economía y Finanzas del Perú. (2019). Plan Nacional de Infraestructura para la Competitividad. <https://repositorio.minedu.gob.pe/handle/20.500.12799/6700>
- Ministerio de Economía y Finanzas del Perú. (2021). Nota técnica para la identificación y estimación de los costos de mantenimiento de inversiones. [https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv\\_publica/docs/capacitaciones/Capacitacion\\_2022\\_08\\_17\\_1.pdf](https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/capacitaciones/Capacitacion_2022_08_17_1.pdf)
- Ministerio de Economía y Finanzas del Perú. (2019). Informe Económico: Indicadores de calidad de infraestructura. (Referencia secundaria en: ComexPerú, 2025). <https://www.mef.gob.pe/es/ComexPerú, 2025>.
- Munasinghe, T., y Pasindu, H. R. (2021). Sensing and mapping for better roads: initial plan for using federated learning and implementing a digital twin to identify the road conditions in a developing country-Sri Lanka. arXiv:2107.14551 [cs.CY]. <https://arxiv.org/abs/2107.14551>
- Oditallah, M., Alam, M., Ekambaram, P., y Ranjha, S. (2025). Review and Insights Toward Cognitive Digital Twins in Pavement Assets for Construction 5.0. *Infrastructures*, 10(3), 64. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10030064>
- Oreto, C., Massotti, L., Biancardo, S. A., Veropalumbo, R., Viscione, N., y Russo, F. (2021). BIM-based pavement management tool for scheduling urban road maintenance. *Infrastructures*, 6(11), 148. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6110148>
- Paterson, D., y Rossigny, P. (2022). Road Asset Management for Developing Countries. <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/7d1b3f8c-7a7c-5e7c-bc6f-9a5e6e8b5e2c>
- Pregolato, M., Gunner, S., Voyagaki, E., De Risi, R., Carhart, N., Gavriel, G., Tully, P., Tryfonas, T., Macdonald, J., y Taylor, C. (2022). Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of digital twins for existing infrastructure. *Automation in Construction*, 141, 104421. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104421>
- Rozas, D., y Sánchez, R. (2004). Infraestructura y desarrollo en América Latina. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6376/1/S2004015\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6376/1/S2004015_es.pdf)
- Sanfilippo, F., Thorstensen, R. T., Jha, A., Jiang, Z., y Robbersmyr, K. G. (2022). A Perspective Review on Digital Twins for Roads, Bridges, and Civil Infrastructures. In 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME) (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICECCME55909.2022.9988693>
- Sark, M., y Sadhu, A. (2024). Recent progress and future outlook of digital twins in structural health monitoring of civil infrastructure. *Smart Materials and Structures*, 33(3), 033001. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ad2bd7>
- Sauer, P. C., y Seuring, S. (2023). How to conduct systematic literature reviews in management research: a guide in 6 steps and 14 decisions. *Review of Managerial Science*, 17(5), 1899–1933. <https://doi.org/10.1007/s11846-023-00668-3>
- Scolamiero, V., y Boccardo, P. (2025). Mobile Mapping System for Urban Infrastructure Monitoring: Digital Twin Implementation in Road Asset Management. *Land*, 14(3), [Número de artículo - si estuviera disponible, se añadiría. Se asume que el PDF era un pre-print o versión aceptada]. [https://iris.uniroma1.it/retrieve/1e26ed99-ffe2-4d6e-b670-b1473ad3083b/Scolamiero\\_Mobile-mapping-system\\_2025.pdf](https://iris.uniroma1.it/retrieve/1e26ed99-ffe2-4d6e-b670-b1473ad3083b/Scolamiero_Mobile-mapping-system_2025.pdf)
- Sierra, C., Paul, S., Rahman, M. A., y Kulkarni, A. (2022). Development of a cognitive digital twin for pavement infrastructure health monitoring. *Infrastructures*, 7(8), 113. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7080113>

- Sun, Z., Jayasinghe, S., Sidiq, A., Shahrivar, F., Mahmoodian, M., y Setunge, S. (2024). Approach Towards the Development of Digital Twin for Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure: A Comprehensive Review. *Sensors*, 24(1), 59. <https://doi.org/10.3390/s24010059>
- Talaghat, M. A., Golroo, A., Kharbouch, A., Rasti, M., Heikkilä, R., y Jurva, R. (2024). Digital twin technology for road pavement. *Automation in Construction*, 168, 105826. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105826>
- Wu, D., Zheng, A., Yu, W., Cao, H., Ling, Q., Liu, J., y Zhou, D. (2025). Digital Twin Technology in Transportation Infrastructure: A Comprehensive Survey of Current Applications, Challenges, and Future Directions. *Applied Sciences*, 15(4), 1911. <https://doi.org/10.3390/app15041911>
- Yan, B., Yang, F., Qiu, S., Wang, J., Cai, B., Wang, S., Li, X., y Hu, W. (2023). Digital twin in transportation infrastructure management: a systematic review. *Intelligent Transportation Infrastructure*, 2, liad024. <https://doi.org/10.1093/iti/liad024>
- Yu, D., y He, Z. (2022). Digital twin-driven intelligence disaster prevention and mitigation for infrastructure: advances, challenges, and opportunities. *Natural Hazards*, 112(1), 1–36. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05190-x>
- Yu, G., Zhang, S., Hu, M., y Wang, Y. K. (2020). Prediction of highway tunnel pavement performance based on digital twin and multiple time series stacking. *Advances in Civil Engineering*, 2020, Article 8824135. <https://doi.org/10.1155/2020/8824135>
- Zheng, L., Meyendorf, N., y Mrad, N. (2018). The role of data fusion in predictive maintenance using digital twins. *AIP Conference Proceedings*, 1949(1), 020023. <https://doi.org/10.1063/1.5031520>
- Zhengji, L., Xu, X., Jiacheng, X., Yuxiao, F., Wentao, W., Gang, C., Liqiang, Z., y Tianyang, W. (2024). A Efficient and Robust Framework for Pavement Damage Detection. *arXiv:2405.17905 [cs.CV]*. <https://arxiv.org/abs/2405.17905>
- Zhu, J., Zhong, J., Ma, T., Huang, X., Zhang, W., y Zhou, Y. (2022). Pavement distress detection using convolutional neural networks with images captured via UAV. *Automation in Construction*, 133, 103991. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103991>
- Zhu, S., Peng, B., Li, D., Bai, Y., Liu, X., y Li, Y. (2024). Methods for Addressing Pavement Defects Based on Digital Twin Technology--A Case Study of Snow and Water Accumulation on Road Surface. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 512, p. 04015). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451204015>