

# Aproximación al diseño conceptual de la gestión de carreteras inteligentes: una referencia a modelos de participación pública-privada

## Approach to the Conceptual Design of Smart Road Management: A Reference to Public-Private Partnership Models

Gustavo Pedraza-Jaimes <sup>1a</sup>, Jaime Alberto Camacho-Pico <sup>1b</sup>, Hernán Porras-Díaz <sup>1c</sup>

<sup>1</sup> Universidad Industrial de Santander, Colombia. Orcid: 0009-0005-8807-0429 <sup>a</sup>, 0000-0002-9246-4413 <sup>b</sup>, 0000-0001-9402-9995 <sup>c</sup>. Correos electrónicos: [gustavopedrazaj@gmail.com](mailto:gustavopedrazaj@gmail.com) <sup>a</sup>, [jcamacho@uis.edu.co](mailto:jcamacho@uis.edu.co) <sup>b</sup>, [hporras@uis.edu.co](mailto:hporras@uis.edu.co) <sup>c</sup>

Recibido: 25 septiembre, 2023. Aceptado: 3 febrero, 2024. Versión final: 3 marzo, 2024.

### Resumen

La investigación reconoce la importancia de la infraestructura vial en el desarrollo económico y social de los países. Estos proyectos son intensivos en capital y ciclo de vida extenso; su etapa de operación/explotación es compleja de gerenciar, producto de la asimetría de información durante las etapas del horizonte económico, tal novedad constituye el problema a resolver en la gestión de activos. La solución a nivel de diseño conceptual incorpora los modelos integrales de información y la tecnología “Digital Twins” junto a los algoritmos de inteligencia artificial e industria 4.0, que permite optimizar el proceso de decisiones estratégicas. Entonces, se parte de la actual coyuntura de transformación tecnológica del sector de infraestructura, como espacio para plantear un modelo de gestión gerencial y ofrecer un entorno de toma de decisiones informadas a todos los agentes/actores. Este reto tecnológico se asume con la metodología “Design Science Research” para modelar un esquema empresarial que propenda por fortalecer los procesos misionales, como respuesta a los riesgos de gobernanza de información de activos viales, en los modelos de negocio de Participación Público-Privada, bajo la modalidad de “Project Finance”. La integración tecnológica propuesta maximiza la generación de valor de las instalaciones, en términos económicos, sociales y desarrollo sostenible, con el objetivo final de mejorar la calidad de vida de las personas. El diseño conceptual proporciona una base de conocimiento para la Ingeniería Básica del modelo y avanzar en el paradigma de “Smart Roads”, en correspondencia con los lineamientos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

**Palabras clave:** Smart Roads; Digital Twins; Gestión de Activos Viales; Gestión de Inversiones en Negocios PPP.

### Abstract

The research recognizes the importance of road infrastructure in the economic and social development of countries. These projects are capital intensive and have a long-life cycle; Its operation/exploitation stage is complex to manage, due to information asymmetry during the stages of the economic horizon; such novelty constitutes the problem to be solved in asset management. The solution at the conceptual design level incorporates comprehensive information models and “Digital Twins” technology along with artificial intelligence and industry 4.0 algorithms, which allows

optimizing the strategic decision process. Then, based on the current situation of technological transformation of the infrastructure sector, a business management model is proposed that offers an environment for making informed decisions to all agents/actors. This technological challenge is assumed with the “Design Science Research” methodology to model a business scheme that tends to strengthen mission processes, in response to the risks of information governance of road assets, in Public-Private Partnership business models, under the “Project Finance” modality. The proposed technological integration maximizes the generation of value of the facilities, in economic, social and sustainable development terms, with the ultimate objective of improving people's quality of life. The conceptual design provides a knowledge base for the Basic Engineering of the model and advance in the “Smart Roads” paradigm, in correspondence with the guidelines of the Sustainable Development Goals.

**Keywords:** Smart Roads; Digital Twins; Road Asset Management; PPP Business Investment Management.

## 1. Introducción

El sector de infraestructura no es muy propenso a recibir e implementar con buena capacidad de respuesta las innovaciones tecnológicas, seguramente por las implicaciones y riesgos de corto plazo que se deben asumir por esos cambios y avances en el conocimiento aplicado a la industria. En particular, con el desarrollo de los modelos integrales de información, se ha ampliado las posibilidades de utilización de estos novedosos sistemas *-que han sido aplicados fundamentalmente en procesos técnicos de diseño y construcción-* a las áreas gerenciales de gestión de activos en las etapas de operación/explotación y de cierre de las instalaciones.

A nivel general, las cuatro etapas principales de un proyecto de infraestructura comprenden la planeación y diseño, la construcción, la operación/explotación y el cierre/terminación; bajo un concepto de *economía circular*, consistente en un ciclo continuo de desarrollo positivo que conserva y transforma los activos de infraestructura, en condiciones apropiadas de sostenibilidad, optimizando el uso de los recursos y minimizando los riesgos del sistema en su vida económica hasta su culminación. Hasta ahora los modelos de información se han empleado con éxito y en forma frecuente en las etapas de planeación y diseño y de construcción, dejando de lado la introducción e implementación de estas innovaciones en las etapas posteriores del ciclo de vida.

En estas circunstancias, el importante reto que puede plantearse con los novedosos modelos integrales de información consiste en dos direcciones, de manera horizontal al promover y contribuir con su aplicación en las etapas de operación/explotación y de cierre de los activos, privilegiando el manejo escalable, acumulado y continuo de la información; y de otro lado, en sentido vertical, al elevar su utilización a niveles de gestión gerencial y tecnológica en las cuatro etapas mencionadas del ciclo de vida de la infraestructura.

Ahora bien, estas innovaciones tecnológicas emergen dentro de un contexto muy particular en la industria de la construcción de infraestructura, caracterizado por un factor coyuntural asociado con las crisis económicas recientes de fin de los años noventa y de la segunda mitad de la primera década del presente siglo, que afectó notablemente al sector inmobiliario, a la industria de la construcción, y a la economía mundial; pero también, a un elemento estructural e intrínseco relacionado con su sistema productivo predeterminado a mantener el *statu quo* con poco espacio para adaptarse prontamente a los cambios tecnológicos [1].

De otro lado, también es fundamental mencionar los enormes requerimientos de inversión y de fuentes de financiación para atender las necesidades crecientes del desarrollo del sector de infraestructura, además de las dificultades de la planificación a largo plazo y la problemática inherente de la industria en el transcurso de las etapas del ciclo de vida de los activos y con mayor intensidad en la operación/explotación *-falta de tecnología, sobrecostos, incumplimientos de los contratos, carencia de regulación económica, insuficiente información para toma de decisiones, deficiente nivel de servicio, y compleja asignación y atención de riesgos (institucionales, económicos, financieros, de mercado, operacionales, ambientales, entre otros)-*, en particular en países en desarrollo; y un asunto de especial connotación dentro del estado actual de la gestión se debe conceder al ejercicio poco transparente en el uso de los recursos públicos como fuente de financiación de la conservación y expansión de la infraestructura vial.

No obstante, históricamente el sector ha ejercido como un indicador de crecimiento económico, como quiera que explica en parte el progreso de un país y su nivel de desarrollo social, fundamentalmente por su importante contribución al PIB y a la masiva generación de empleo (alrededor del 10% del PIB mundial y el 7% de empleo de la población) [2].

Para enfrentar los nuevos desafíos, surge el concepto *Building Information Modeling* - BIM como propuesta contemporánea de un modelo de información para la construcción, que comprende una novedosa metodología de trabajo colaborativo en el desarrollo de este tipo de proyectos, con el objeto de mejorar los niveles de eficiencia con notables beneficios en el sector. Durante su aplicación y evolución reciente, BIM ha demostrado que supera ostensiblemente los métodos tradicionales de gestión de la información, en las etapas de diseño y construcción, reduciendo los recursos y costos para alcanzar finalmente mejores resultados económicos de los proyectos, y en términos agregados permitiendo administrar menores niveles de riesgos y aumentando la productividad de la industria.

En tal sentido, habiendo evidenciado las bondades de este Modelo Integral de Información [3], el cambio tecnológico es inevitable, conveniente y apremiante, mediante la transformación del conocimiento aplicado para integrar diversas disciplinas y distintos actores hacia la innovación en la gestión de activos, en las dos direcciones previamente enunciadas: en la implementación en todas las etapas del ciclo de vida *específicamente en el período de operación/explotación*- y en la optimización del proceso de toma de decisiones a nivel gerencial.

Los proyectos de infraestructura vial son intensivos en capital, con un efecto expansionista sobre la actividad económica, tanto de corto como de largo plazo; por un lado, las inversiones en las etapas de diseño y construcción generan impactos asociados al corto plazo y de orden coyuntural, mientras que en la etapa de operación/explotación de los sistemas viales sus procesos y resultados son de naturaleza permanente y cubren un horizonte de largo periodo, relacionado con la vida económica del activo de infraestructura.

Las agencias estatales, los inversionistas y los operadores de infraestructura utilizan la información de los proyectos de desarrollo y de sus activos operativos para tomar decisiones acertadas sobre el ciclo de vida de las instalaciones que conforman un bien o servicio de uso público. Con este objetivo, los modelos integrales de gestión ofrecen información de calidad para optimizar el proceso de toma de decisiones en los negocios, proporcionando información más estructurada, confiable, continua, consolidada y reutilizable, que permite obtener niveles superiores de productividad durante el ciclo de vida de la infraestructura y lograr mayor funcionalidad, rentabilidad y sostenibilidad en la gestión de activos.

De igual forma, la información de la infraestructura con los modelos integrales puede ser escalada, acumulada y transferida a través de todo el horizonte de vida económica, permitiendo reducir las costosas operaciones de reproceso y redundancias en el tratamiento de la información. En particular, la transparencia, objetividad y visión de la información del ciclo de vida de los activos de instalaciones viales posibilita la integración con estándares e indicadores del sector, al igual que fácilmente asimila los nuevos cambios de procesos y tecnologías emergentes, y en consecuencia su aplicación puede ser generalizada en esta industria [4].

La etapa de operación/explotación de proyectos viales es bastante compleja de gerenciar, en cuanto a tiempo, recursos, costos, riesgos e impactos sobre el ecosistema; sin embargo, los innovadores modelos integrales de gestión de la información con un enfoque tecnológico colaborativo y mayores facilidades gerenciales, admiten atender esta problemática al mejorar el proceso de toma de decisiones, y en especial durante el periodo de servicio o funcionamiento de los activos de infraestructura vial.

A nivel mundial, los Modelos Integrales de Información continúan profundizando y ampliando su aplicación, en ese sentido la metodología BIM surge como nuevo estándar en proyectos de construcción exigible como requisito tecnológico dentro las licitaciones públicas, en diferentes países de Europa, en USA y Canadá, y con perspectiva inmediata de ampliar su aplicación a nivel global, con el fin de obtener mayores beneficios económicos al disminuir tiempos, reducir costos y aumentar la eficiencia y la transparencia en los proyectos públicos.

Ahora bien, en un informe sobre el sector de infraestructura vial se afirma que en “Latinoamérica la inversión en este sector es 35% menos de la requerida” (Serebrisky et al., 2015) [5], y en tal circunstancia con la implementación de BIM seguramente se reduciría esta brecha, en razón a los importantes ahorros que se lograrían y, por ende, al optimizar los recursos para estas inversiones. Una estimación consignada en el referido documento expresa que “los diseños deficientes son responsables del 40% de los cambios durante la construcción de infraestructura y del incremento de su costo total”. En consecuencia, con la utilización de BIM se podrían controlar los plazos de construcción, evitar las ampliaciones y prórrogas en contratos y los sobrecostos correspondientes.

Los beneficios se pueden extrapolar a la etapa de operación/explotación de la infraestructura de

transporte, pues la información integral y consolidada del proyecto en las etapas previas de diseño y construcción será la base para la toma de decisiones sobre la operación y mantenimiento del activo vial, y en tales condiciones se facilitará la gestión gerencial al reducir costos y optimizar los resultados.

En esta dirección, los organismos multilaterales de crédito como el Banco Interamericano de Desarrollo BID y el Banco Mundial - BM, están orientando sus acciones a la incorporación de BIM en las etapas de diseño y construcción de los proyectos de infraestructura que financian. E igualmente, en la formulación de políticas públicas, apoyarán a los países en reformas normativas y regulatorias para la adopción del BIM en las etapas de construcción/ejecución y de operación/explotación de proyectos.

Para ilustrar precisamente los evidentes beneficios derivados de la aplicación de los Modelos Integrales de Información en todas las etapas del ciclo de vida de los proyectos y/o activos de infraestructura *-en general en todos los sectores-*, se puede partir de la hipótesis que del total de los costos (100%) en la vida económica del activo los montos de inversión asociados a las etapas de diseño y de construcción representan aproximadamente un 20% (en un rango de 16% a 22%), y los costos de la etapa de operación/explotación corresponden alrededor del 80%, es decir 4 veces la inversión total previa a la puesta en servicio de las instalaciones [6].

En consecuencia, si la vida útil promedio de un activo de infraestructura es de más de 50 años, la gestión de activos comprendería todas las actividades relacionadas con su operación y mantenimiento, y de esta forma las decisiones gerenciales sobre el funcionamiento de la infraestructura tendrían un significativo impacto asociado con el costo de esta etapa que representa 4 veces la suma de la inversión realizada en los periodos precedentes de diseño y construcción. En realidad, la metodología de los modelos integrales se fundamenta en la administración eficiente de la información como objeto central en todo el ciclo de vida de las instalaciones, produciendo amplios beneficios en la gestión de activos de infraestructura, al optimizar la utilización de recursos y obtener mejores resultados económicos y sociales [7], [8].

En estas condiciones, un modelo de información paramétrico combina un modelo de datos y relaciones (gestión de información), con un modelo de comportamiento (gestión de cambios/modificaciones), de forma integrada “donde todo es paramétrico y todo está interconectado”. En resumen, el modelo integral de información con elementos paramétricos se caracteriza

por la auto coordinación de la información en tiempo real en cada una de las versiones del modelo. “En virtud a la condición de asociatividad bidireccional entre todos los componentes, la propagación total e inmediata de los cambios tiene como resultado un ‘modelo de información’ coherente, fiable y de alta calidad” [9]. Los modelos de información deben facilitar los roles y actividades de los agentes/stakeholders en la gestión de activos; particularmente, a mejorar el desempeño financiero, tomar decisiones de inversión basadas en información, gestionar el riesgo, mejorar las operaciones y los servicios, promover la responsabilidad social empresarial y lograr la sostenibilidad organizacional con mayores niveles de eficiencia y eficacia de sus activos.

Así las cosas, la gestión de activos basada en modelos integrales de información tiene una visión holística del proceso de toma de decisiones, puesto que considera totalmente el ciclo de vida de los activos, dejando de lado la percepción sólo parcial de cada etapa. La práctica habitual es absolutamente contraria, pues la toma de decisiones de muchos inversionistas y gestores de activos está focalizada únicamente en seleccionar las opciones de inversión pensando en la solución más económica a corto plazo, sin estudiar las implicaciones en todo el ciclo de vida de las instalaciones físicas. Esta visión cortoplacista se materializa en una situación de asimetría de información que los stakeholders deben asumir a través de las etapas del ciclo de vida, por la pérdida sistemática de contenido y calidad de la documentación de análisis, tal novedad se identifica como el problema principal a resolver de la gestión gerencial de los activos.

La persistencia de este enfoque de corto plazo puede conducir a un riesgo mayor en el proceso de toma de decisiones a los inversionistas y gestores de activos, al eventualmente concebir planes de negocios totalmente distorsionados que resulten en acciones irreflexivas y contraproducentes con los objetivos empresariales y a caer en incumplimiento de los requerimientos funcionales de calidad, costo y nivel de servicio con los usuarios finales.

En términos aún más descriptivos, el contexto resolutivo y de amplio impacto de la gestión de activos de infraestructura vial requiere de instrumentos gerenciales de características, especificaciones y condiciones de adaptabilidad para atender la dinámica natural del entorno de los negocios, y también hace sentido proporcionar una solución a la problemática observada a lo largo de las etapas del ciclo de vida explicada por la pérdida sistemática de valor de la información, la fragmentación temporal de las decisiones en el

horizonte económico, la ausencia de ambiente colaborativo entre los agentes/stakeholders por su desempeño independiente y de autodeterminación, y la apremiante atención de los riesgos organizacionales.

Ante esta premisa, la investigación presenta el diseño conceptual de un modelo de gestión de activos a partir de la referencia de BIM a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida de la infraestructura, aprovechando el alcance de la dimensión “7D” ofrecida por Building Information Modeling correspondiente a la gestión de instalaciones, para incorporar a estos modelos de información la tecnología “Digital Twins” junto a los algoritmos de inteligencia artificial e industria 4.0, y facilitar el proceso de toma de decisiones a nivel gerencial con el propósito de maximizar la generación de valor de las instalaciones, en cumplimiento de los objetivos empresariales y sociales.

Sin duda, estamos presenciando una transformación del sector de infraestructura en cuanto a movilidad de información, conocimiento y experiencia, que da lugar a propiciar la integración de las innovaciones tecnológicas de la “Cuarta Revolución Industrial” en la gestión gerencial de activos físicos. En esa línea, el trabajo pretende hacer parte de este proceso de transformación con la finalidad de que todos los actores/agentes interesados tomen decisiones objetivamente informadas, en particular en la etapa de operación/explotación de la infraestructura vial, y a la vez contribuir al ‘stock’ de conocimiento existente en el área de gestión de activos.

## 2. Metodología

### 2.1. Descripción

Desde hace algún tiempo en el campo de la ingeniería, las ciencias de la información y la gestión gerencial ha tomado importancia la investigación a través de la metodología “Design Science Research” - DSR, cuya mejor traducción es la investigación científica basada en el diseño y la intención. Es una nueva forma de considerar y formalizar la actividad de investigación en esas disciplinas, mediante otra estrategia para producir conocimiento, con el nivel de rigor de las metodologías convencionales de las ciencias naturales. Las divergencias radican en que las ciencias naturales

detallan, describen o descubren los fenómenos en el mundo, siempre buscando la verdad; y, de otra parte, en la ingeniería, los sistemas y la gestión se orienta la investigación a cambiar y transformar “la realidad”, se responde a la inquietud de cómo deben o deberían ser “las cosas”, con el fin de buscar la utilidad o uso de éstas. Desde esa perspectiva, el valor o mérito del proceso está en sí la solución funciona o contribuye a mejorar la vida de las personas, en últimas si resuelve un problema a partir de la generación del conocimiento.

La metodología DSR propone la construcción de “artefactos” para proporcionar una solución apropiada a un problema previamente identificado en su dominio; en cualquier caso, la solución debe ser innovadora a un problema complejo. El proceso de construcción del artefacto está definido por iteraciones sucesivas de las actividades de diseño, construcción y evaluación para obtener la solución validada satisfactoriamente, lista para ser comunicada y liberada para su implementación. Según la literatura, se ilustran cuatro tipos de artefactos, clasificados en: Constructos (vocabulario y simbología conceptual de un dominio), Modelos (conjunto de abstracciones, representaciones y proposiciones o sentencias que expresan relaciones entre constructos), Métodos (algoritmos y prácticas, conjunto de pasos de una tarea, conocimiento de la manera de hacer algo), e Instancias (operacionalización de constructos, modelos y métodos; implementaciones y prototipos).

A continuación, se ilustra el marco conceptual para comprender, ejecutar y evaluar la investigación bajo la metodología DSR (ver [Figura 1](#)).

El proceso DSR comprende tres ciclos: Ciclo de Relevancia, Ciclo de Diseño y Ciclo de Rigor. El Ciclo de Relevancia identifica, define y describe el dominio del problema, junto con las investigaciones sobre el estado del arte de la posible solución del problema. En el Ciclo del Diseño se iteran las actividades de especificaciones, construcción y evaluación del artefacto. Y, por último, en el Ciclo de Rigor se evidencia que el diseño esté soportado en teorías científicas, métodos y prácticas reconocidas y aceptadas.



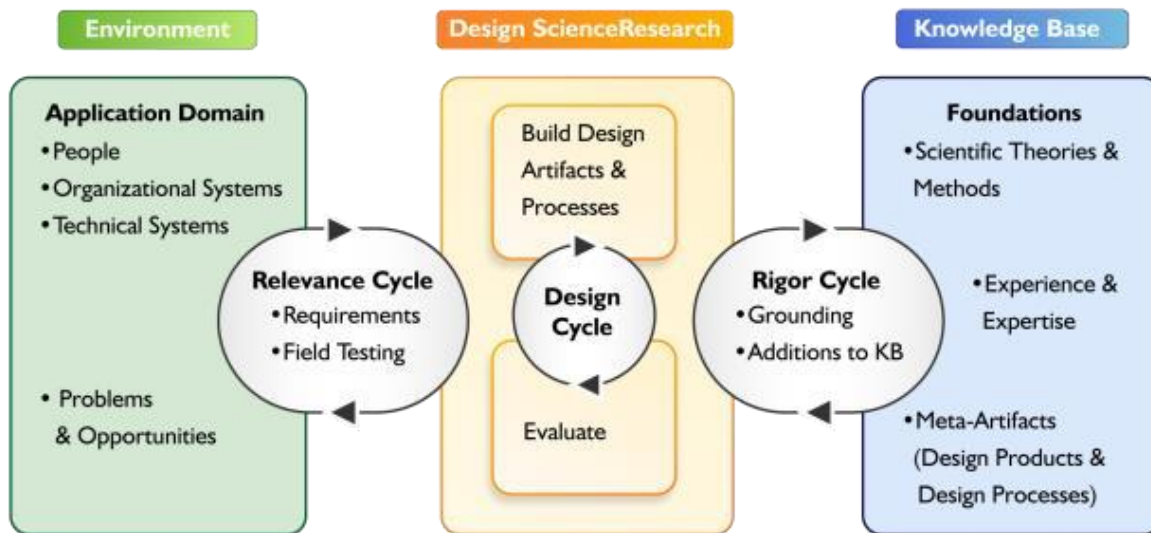


Figura 1. Proceso de la metodología Design Science Research. Tomado de [25].

En cuanto al proceso de determinar la viabilidad del artefacto, los métodos descriptivos de evaluación se deben aplicar particularmente en artefactos innovadores que evidencien amplias bondades tecnológicas y de gestión en las disciplinas de ingeniería, ciencias de la información y management; en DSR es importante responder a las preguntas de ¿Que utilidad se obtiene del artefacto? y ¿Que explica ese beneficio? En la **Tabla 1** se presentan los métodos de evaluación.

En síntesis, esta investigación plantea un producto, a nivel de artefacto dentro de la metodología empleada “Design Science Research”- DSR, consistente en un ‘modelo conceptual de gestión de activos’ entendido como una representación del dominio de una solución con relación a la problemática identificada de gobernanza de la información en el proceso de toma de decisiones, en la etapa de operación/explotación de la infraestructura vial.

## 2.2. Desarrollo

En primera instancia, la metodología debe definir y determinar el concepto de la planificación de proyectos de infraestructura vial, para precisar los fundamentos y bases teóricas que permitirán la asociación e integración de este concepto con la etapa de operación/explotación de los activos. En especial, cuando se hace referencia a la etapa de planificación, se afirma que es aquella función de la gestión gerencial base fundamental para todo el ciclo de vida del proyecto, en la que se determinan los objetivos, planes, programas, alcances, y demás aspectos propios de esta primera estimación, detallando la forma estratégica de alcanzarlos,

asignando tiempos y orden a las tareas, por lo tanto, esta etapa presenta un modelo teórico para las etapas posteriores [10], [11].

Ahora, esta investigación subraya el enfoque integral de los proyectos de infraestructura vial, de tal manera que las actividades asociadas a la etapa de operación/explotación deben ser identificadas y dimensionadas desde el periodo de planeación, considerando la importancia de la magnitud de las inversiones de capital CAPEX y los costos de operación/explotación OPEX durante el ciclo de vida; e igualmente, atendiendo a los requerimientos y necesidades sociales y al impacto generado sobre el crecimiento y desarrollo de la economía [12]. De otro lado, también es fundamental apreciar las limitaciones de recursos económicos, las dificultades de la planificación a largo plazo y la problemática inherente del sector de infraestructura *-falta de tecnología, sobrecostos, incumplimientos de los contratos, entre otros-*, en particular en países en desarrollo, y un espacio específico se debe conceder al uso transparente de los recursos públicos como fuente de financiación para la conservación y expansión de la infraestructura vial.

La planificación de proyectos es un elemento esencial dentro del proceso de gestión gerencial para adelantar apropiadamente las diferentes etapas del ciclo de vida de los activos, propiciando un desarrollo estructurado del conjunto de componentes y actividades en condiciones controladas de tiempo, calidad y recursos, con el fin de lograr los objetivos del proyecto. Los resultados se traducen en generar una visión objetiva del

horizonte de vida útil, reducir los niveles de incertidumbre y mitigar los riesgos, asignar eficientemente los recursos y generar mayor valor de los activos, a través de una percepción más integral y sistémica [13], [14]. De esta manera, se orienta la investigación hacia la asociación e interrelación de las actividades y procesos en las etapas de planeación-diseño y de construcción, que serán los *'inputs'* para abordar la etapa de operación/explotación.

Tabla 1. Métodos de evaluación en DSR

<b>Observacional</b>	Estudio de caso: estudiar en profundidad en el entorno empresarial.
	Estudio de campo: monitorear el uso en múltiples proyectos.
<b>Analítico</b>	Análisis estático: examinar la estructura del artefacto en busca de cualidades estáticas.
	Análisis de arquitectura: estudio del ajuste en la arquitectura técnica.
	Optimización: demostrar propiedades óptimas inherentes o proporcionar límites de optimización en el comportamiento.
	Análisis dinámico: estudio para cualidades dinámicas.
<b>Experimental</b>	Experimento controlado: estudiar en un entorno controlado para determinar sus cualidades.
	Simulación: ejecutar con datos artificiales.
<b>Pruebas</b>	Pruebas funcionales (caja negra): ejecución de interfaces para descubrir fallas e identificar defectos.
	Pruebas estructurales (cuadro blanco): pruebas de cobertura de algunas métricas (por ejemplo, rutas de ejecución) en la implementación.
<b>Descriptiva</b>	Argumento informado: información de la base de conocimientos (por ejemplo, investigaciones relevantes) para construir un argumento convincente.
	Escenarios: construcción escenarios detallados para demostrar su utilidad.

Traducido a partir de [26].

### 2.3. Producto

El estudio comprende el conocimiento general del estado del arte de la gestión de proyectos y activos de infraestructura vial y las perspectivas de la tecnología para su incorporación en los respectivos procesos gerenciales, mediante una revisión de la literatura que determina la línea base de la investigación. Esta fase consiste en la identificación de los beneficios de los modelos integrales de información en la toma de decisiones, el impacto de esta tecnología en la actualidad, como también la comprensión de sus 7 dimensiones 7Ds-, abarcando desde las tres dimensiones geométricas ya conocidas hasta aquellas que comprenden tiempo 4D, costos 5D, sostenibilidad 6D y una última dimensión 7D relacionada precisamente con la gestión activos en la etapa de operación/explotación [15].

Los proyectos viales se diseñan con una expectativa de vida económica extensa, con un costo del ciclo de vida concentrado significativamente en la etapa de operación/explotación en tanto que suele representar alrededor del 80% del costo total; no obstante, las decisiones más cruciales se toman en la etapa de planeación y diseño, determinando en gran parte el comportamiento futuro de las etapas siguientes de construcción y de operación/explotación.

Entonces, con tal premisa, se han identificado y examinado los procesos estructurales en la gobernanza de la información al implementar el uso de los modelos integrales, con especial atención en las innovaciones tecnológicas de trabajo colaborativo de los agentes/stakeholders durante el ciclo de vida, particularizando en la toma de decisiones de la tercera etapa de prestación del servicio de los activos viales [16]. Al respecto, es preciso mencionar la pertinencia de las funcionalidades de estos modelos frente a los requerimientos de información en el periodo de operación/explotación, para garantizar el objetivo final de ofrecer un servicio óptimo a los usuarios de las instalaciones [17].

En esa línea, la investigación concentra la atención en los métodos y técnicas innovadoras de gestión de activos que permitan a los gerentes obtener información de alta calidad y aplicar las nuevas tecnologías de la industria 4.0, para tomar decisiones informadas basadas en el riesgo del modelo de negocio.

En particular, se enfatiza en la adopción de prácticas modernas de gerencia de activos que consideran el ciclo de vida total de la infraestructura, con el propósito de optimizar las inversiones y alinear los proyectos con los

objetivos de desarrollo sostenible -ODS- de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible de los Estados miembros de la Organización de las Naciones Unidas -ONU-.

### 3. Modelo conceptual de gestión gerencial y tecnológica de activos de infraestructura vial

#### 3.1. Transformación digital y gerencia de activos

La gestión de activos complementada con la aplicación de los modelos integrales de información debe partir de manera estratégica desde la perspectiva de los usuarios finales, como el eslabón principal de la cadena de valor del servicio ofrecido por la infraestructura.

Con esa premisa o hipótesis de la presente investigación, los inversionistas y los gestores de activos tienen a su disposición las nuevas tecnologías de los modelos de información, como una estrategia empresarial con el objeto de atender apropiadamente las necesidades de la demanda y administrar en la debida forma los riesgos inherentes a sus inversiones, en cumplimiento de sus planes de negocios. Esto compromete la dimensión de los modelos integrales de información, en su aplicación a la gestión de activos, como una innovación tecnológica que crea un escenario más propicio y confiable para gerenciar y tomar decisiones sobre las inversiones en infraestructura.

En consecuencia, en este entorno los modelos se convierten en “Business Information Model”, modelo de información empresarial o de negocio, que al ser aplicado a nivel gerencial y con alcance misional da como resultado o producto de la investigación un Modelo de Información de Gestión de Activos - “*Asset Management Information Model*”, que precisamente comprende la solución a la problemática previamente identificada en el sector de infraestructura.

En la etapa final de la investigación, se propone el diseño conceptual de un modelo integral de información, con base en la metodología BIM, para la gestión gerencial y tecnológica de activos de infraestructura vial, obteniendo un modelo que comprenda los procesos y actividades de la etapa de operación/explotación. El objetivo del modelo consistirá en planificar, administrar, controlar y gestionar de manera eficiente y óptima la prestación de los servicios de estos activos, para generar mayor valor en la explotación de las instalaciones.

De manera especial la investigación se centra en la dimensión 7D de BIM, con el objeto de formular un modelo integral de información para la gestión de activos de infraestructura vial en la etapa de

operación/explotación, a partir de la información producida, escalada y consolidada a través de las diferentes etapas del ciclo de vida económica, con el propósito particular de tomar decisiones de inversión para optimizar la generación de valor de los activos. En efecto, el modelo se centrará en la Gestión de Activos dentro de un entorno BIM, como un agente facilitador en el funcionamiento apropiado de la infraestructura y la optimización de los costos durante la fase de operación/explotación, para permitir a nivel gerencial disponer de la información suficiente y con la oportunidad requerida a fin de mejorar la eficiencia y reducir el costo total del ciclo de vida de las instalaciones.

Ahora bien, el diseño incorpora un componente novedoso, consistente en la tecnología disruptiva de gemelos digitales “Digital Twins” dentro de la transformación industrial 4.0 aplicada al sector de infraestructura vial; entonces surgen nuevos conceptos en el modelo de gestión denominados de manera equivalente como “Digital Roads”, “Smart Roads”, ó “Digital Twins for Roads”, para articular y administrar toda la información de los procesos con la tecnología apropiada y así ofrecer a los agentes o partes interesadas un entorno gerencial de decisiones informadas y objetivas, en la etapa de operación/explotación de los activos.

De forma específica, en el modelo conceptual, los procesos producen datos que se recrean como información para ser procesada y analizada a través de recursos tecnológicos de la industria 4.0, incluida las innovaciones en materia de recursos de conectividad, para facilitar en tiempo real la facultad de toma de decisiones gerenciales en las actividades de prestación de servicios de la infraestructura vial.

Ante todo, se plantea un modelo de gestión que tenga como eje central al “customer”, al usuario final de la infraestructura del servicio público de transporte, siempre buscando mayores beneficios sociales en términos de ahorros de tiempo de viaje y mayor seguridad vial, así como de satisfacción en la calidad del servicio para lograr una experiencia notable que impacte positivamente en el nivel de vida de la población. Este objetivo se logra, siempre y cuando se solucione la problemática de gestión de la información descrita inicialmente, que se traduce en la pérdida sistemática de valor de la documentación a través de las etapas del ciclo de vida de los activos viales; en consecuencia, el modelo conceptual de gestión gerencial que se plantea preserva la cantidad y la calidad del acervo informático para minimizar el riesgo empresarial en la toma de decisiones de la alta dirección.



Al respecto, el modelo de gestión junto a los recursos tecnológicos de la industria 4.0, facilitarán las actividades de ingeniería predictiva e ingeniería prescriptiva, que permitan estimar el comportamiento real de las instalaciones durante su ciclo de vida, e igualmente incorporar procesos de analítica avanzada para automatizar decisiones tácticas de coyuntura y determinaciones estratégicas de largo plazo, con la introducción de soluciones de inteligencia de negocios. El diseño conceptual del modelo gerencial de gestión de activos viales constituye una transformación tecnológica en la visión estructural de generación de valor dentro de la política pública del sector, orientada a la misión de contribuir efectivamente al beneficio integral de la sociedad. En efecto, se privilegia el interés colectivo sobre la rentabilidad particular de los inversionistas privados, bajo un pensamiento económico moderno de generación de valor para lograr mayor desarrollo y equidad de la población en general.

Los procesos gerenciales de gestión de activos están basados en los datos del sistema físico, que al convertirse en información de valor por las actividades de interpretación y análisis soportan la toma de decisiones en la administración de los activos; luego, en tales circunstancias, de la cantidad y calidad de la información depende la generación de mejores determinaciones para optimizar la gestión. Los gerentes encargados de la gestión de activos propenden por la información objetiva -confiable, relevante, actualizada- con el fin de determinar las soluciones más pertinentes a las contingencias propias del sistema [18].

En esa misma línea, los gemelos digitales proveen una utilización innovadora de la información en formato digital, que expresa la gran capacidad para representar la obtención de valor de los activos, en este caso de infraestructura vial, y conducir a tomar decisiones mejor informadas a lo largo del ciclo de vida económica de las instalaciones. La propiedad de facilitar y respaldar la gestión gerencial de activos viales que evidencian los Digital Twins al configurar un circuito cerrado entre los subsistemas físico y digital, emula y confirma el proceso continuo del ciclo PHVA -planificar, hacer, verificar y actuar- de la gestión de activos [19].

Así mismo, como quiera que el proceso es continuo y cíclico el gemelo digital tiene la facultad de acumular la información para crear una base de datos especial de conocimiento sistémico, con el propósito de lograr un mejoramiento continuo en la gestión gerencial de la infraestructura y de suma utilidad en la implementación de aplicaciones de inteligencia artificial en el campo de la ingeniería predictiva y prescriptiva [20].

La visión moderna de la gestión de activos viales sugiere dos planos o dimensiones de actuación que la identifican como un proceso inteligente, de una parte las decisiones gerenciales abordan un horizonte delimitado por las etapas del ciclo de vida; y por otro lado, el proceso tiene una hipótesis fundamental consistente en la transformación digital de este sector económico, que aprovecha la información y la tecnología para facilitar la toma de decisiones y permitir la gestión de la infraestructura ante circunstancias coyunturales de tiempo presente, como a nivel de acciones de orden estructural de mediano y largo plazo en la generación de valor de los activos [21].

En la etapa de operación/explotación de las instalaciones, en un modelo de negocio de Participación PúblicoPrivada PPP bajo un esquema de Project Finance, caracterizado por el extenso periodo de explotación y la dinámica compleja de las actividades e interrelaciones contractuales y las contingencias extraordinarias entre los agentes/stakeholders, determinan la necesidad de disponer infaliblemente de una información estructurada, confiable, segura, accesible y colaborativa. Para el efecto, la implementación de la tecnología de gemelos digitales tiene el potencial de contribuir integralmente en la gestión gerencial de la infraestructura, minimizando en especial los riesgos empresariales inherentes en la gobernanza de la información del modelo de negocio [22].

La gestión de activos promueve un enfoque sistémico que favorece la adopción tecnológica de Digital Twins, por consiguiente, la integración de procesos se puede facilitar al unificar e identificar las actividades gerenciales del ciclo de vida de la infraestructura física con el circuito cerrado de la información del subsistema virtual (dataanálisis-decisión-acción), para crear un modelo autónomo de la gestión de activos viales.

En el modelo de negocio PPP y en particular en el esquema de Project Finance, propio en el dominio del sector de infraestructura vial, la gestión de activos es asignada al agente 'Operator', por responsabilidad delegada del propietario del activo -'Owner'- generalmente la Agencia del Estado encargada del sector; en consecuencia, se puede advertir que la etapa de operación/explotación está asociada con la calidad del servicio y la generación de valor económico y social de las instalaciones. Al respecto, las decisiones acertadas del agente operador son de suma importancia y absoluta competencia, en línea con los términos, condiciones, indicadores y parámetros establecidos por la Entidad del Estado para la operación/explotación de

la infraestructura vial y acordados contractualmente por las partes en la PPP, a efectos de privilegiar ante todo el concepto de remuneración al privado, en este caso el operador, en función de “generación de valor por dinero”.

Con el fin de cumplir las obligaciones derivadas del modelo de negocio, el operador debe gestionar la información multidimensional -tanto discreta como continua- para tomar las mejores decisiones sobre la explotación del activo, incluyendo datos relacionados con el estado físico de las instalaciones, funcionamiento, rendimiento, costos operacionales, costos de mantenimiento y reposición, nivel de prestación del servicio, demanda de transporte, tiempos de operación, presupuestos financieros, entre otros registros y cifras de esta naturaleza. En consecuencia, la gestión de la información se convierte en un elemento fundamental para la gobernanza de la infraestructura vial.

### 3.2. Tecnología digital twins

De hecho, los Digital Twins han sido recursos tecnológicos indispensables en las etapas de “planeación/estudios/diseños” y de “construcción”, como normalmente ha ocurrido con los modelos integrales de información; no obstante, su aplicación en la “operación/explotación” de infraestructuras advierte un futuro promisorio en la transformación del sector, al proporcionar de una parte una nueva práctica de trabajo colaborativo entre los agentes interesados y, de otro lado, ofrecer una mayor comprensión y conocimiento sobre el horizonte de toda la vida económica de los activos, con una visión de sostenibilidad integral para tomar decisiones orientadas a suministrar mejores bienes y servicios a la población en general. La incorporación de las innovaciones de la industria 4.0, como ML, IoT, AI, incluyendo el mundo virtual del metaverso, han permitido y continuarán la creación de sistemas dinámicos bajo Digital Twins que además de simular pueden predecir y prescribir las actividades y comportamientos de los activos de infraestructura en su etapa de explotación a lo largo del ciclo de vida.

La tecnología Digital Twins crea una reproducción virtual en tiempo real con una visualización inmersiva y total de la información de las instalaciones físicas, con el objeto de entregar a la gestión gerencial de activos de infraestructura las utilidades requeridas para lograr soluciones digitales que se traducen “ipso facto” de manera efectiva al sistema real, garantizando obtener mayor valor en la prestación de los servicios a los usuarios finales.

En última instancia, a mediano y largo plazo, se presume que esta integración entre tecnología y gestión de activos se despliega a través de toda la cadena de suministro, para originar gemelos digitales de infraestructura abiertos y continuos, donde las decisiones y acciones de inclusión social se suman a los beneficios ambientales derivados de los objetivos de desarrollo sostenible -ODS- intrínsecos y transparentes en todas las etapas del ciclo de vida de los activos de infraestructura.

Con los gemelos digitales se facilita la comunicación e interacción entre disciplinas o dominios de conocimiento, a partir del trabajo colaborativo entre todos los agentes o partes interesadas, por ejemplo en la relación del diseño del proyecto y la funcionalidad de los activos, en esa etapa inicial se pueden evaluar diferentes alternativas técnicas del proyecto a nivel de diseño y, a su turno, las decisiones sobre modificaciones y/o actualizaciones del activo para optimizar la prestación del servicio son más oportunas y pertinentes al considerar su ciclo de vida. Los modelos digitales proporcionan la información para visualizar, gestionar de forma colaborativa y supervisar los cambios sobre la infraestructura, durante el proyecto y en la etapa de operación.

### 3.3. Modelo conceptual de gestión de activos

Con las novedades de la industria 4.0, los modelos integrales de información han evolucionado hacia la tecnología Digital Twins de reciente adopción en el sector de infraestructura, de preferencia en construcciones verticales en la etapa de estudios y diseños; pero, sin duda, con gran potencial de aplicación en la gestión de activos lineales y durante todo su ciclo de vida. Los gemelos digitales representan de forma virtual las instalaciones físicas correspondientes y personifican la dinámica real de sus actividades a lo largo de las diferentes etapas de la vida económica, produciendo toda la información y documentación digital para facilitar y adelantar los procesos de toma de decisiones dentro de la gestión gerencial de activos.

Entonces, podemos precisar que la administración de la base informática reside en el modelo Digital Twins, que alimenta los algoritmos y aplicaciones de inteligencia artificial para disponer de la información necesaria con el objeto de abordar las soluciones gerenciales en entornos de ingeniería predictiva en el corto plazo o de coyuntura y, de otra parte, en ambientes de ingeniería prescriptiva de alcance estratégico dentro del marco empresarial de la gestión activos viales, en un horizonte mayor.

En particular, el diseño conceptual del modelo resuelve el problema previamente referido de pérdida sistemática de la información a lo largo de las etapas del ciclo de vida de los activos viales, que constituye un riesgo de magnitud empresarial para lograr los niveles de servicio deseados y los beneficios económicos, sociales y de generación de valor; en tal sentido, al disponer de la documentación integral y absoluta de las instalaciones físicas en tiempo real mediante la tecnología Digital Twins, se puede inferir que la gestión gerencial para todos los agentes o stakeholders dentro del modelo de negocio, en este caso de Participación Público Privada - PPP y específicamente en un esquema de Project Finance, se desarrolla de manera totalmente transparente en la medida que las decisiones corrientes de futuro inmediato e igualmente las estratégicas de más alcance temporal, junto con su comportamiento o líneas de acción sobre los activos viales son naturalmente pronosticadas y observadas en el modelo digital. Y a su vez, estas determinaciones son perfectamente evaluadas oportunamente en términos de materializar los objetivos de la propuesta de valor relacionada con la sostenibilidad integral de la infraestructura vial.

En tal sentido, la representación gráfica del diseño conceptual del modelo propuesto bajo la tecnología de Digital Twins tiene una geometría incremental de escalabilidad horizontal y vertical, en la medida que el sistema de información para la gestión gerencial y tecnológica de activos viales permite la virtualización de la infraestructura, en magnitud dentro de la línea de tiempo, a través de las etapas del ciclo de vida desde la planeación-estudios-diseños hasta el final de su operación/explotación y seguidamente el cierre definitivo/desmantelamiento; y de otro lado, posee la propiedad de ascender al nivel gerencial de toma de decisiones para situarse en un rango de inteligencia superior en el modelo de negocio PPP. El gemelo digital se convierte en un sistema de gestión de información perteneciente a activos viales, con suficientes propiedades derivadas de la transformación digital que favorecen los procesos gerenciales de generación de valor.

Desde una perspectiva epistemológica, a principios del siglo, en 2003, Digital Twins aparece en primeras manifestaciones en la industria de fabricación o manufactura (Iberdrola.com) y comprende la representación de un modelo virtual de un sistema físico con la información de su estructura, componentes, comportamiento y demás datos de su naturaleza, en circunstancias propias de tiempo, modo y lugar; además de disponer de una comunicación bidireccional entre la realidad y la virtualidad. Empero, de la revisión de la limitada literatura sobre la tecnología de gemelos

digitales en el sector de infraestructura lineal, realizada por D. Broo y J. Schooling [23], se puede inferir que aún no hay un concepto convergente acerca de su alcance, extensión y expectativas; aun así, es evidente que se observa una tendencia de valoración muy positiva y significativa en su proceso de maduración de acuerdo con el "ciclo de sobre expectativa" de la empresa consultora Gartner Inc. (2018), es decir en el horizonte de corto plazo hay consenso y confianza sobre los efectos y beneficios derivados de esta transformación digital en la industria.

La presente investigación procura preferencialmente aportar al desarrollo del sector de carreteras mediante la presentación de un modelo conceptual para la gestión gerencial de activos de infraestructura vial (Road Asset Management), basado en la implementación de la tecnología de gemelos digitales de la industria 4.0 en desarrollo de las etapas del ciclo de vida de las instalaciones físicas. En tal sentido, desde el punto de vista de la disciplina de la Ingeniería de Consulta, la idea central consiste en plantear los componentes principales y sus relaciones del modelo de información para la gestión gerencial y tecnológica de activos viales, que propenda por facilitar los procesos de toma de decisiones de tal manera que el objetivo sea privilegiar la generación de valor desde el punto de vista del beneficio social o interés colectivo.

En particular en el sector de infraestructura vial, se requiere ante todo precisar el alcance de la tecnología de gemelos digitales para su implementación dentro del entorno de las organizaciones y, en especial, su importancia en la incorporación a la gestión gerencial de la alta dirección.

El gemelo digital es un sistema compuesto por dos subsistemas idénticos que operan paralelamente en tiempo real en dos ambientes, uno físico y otro virtual. En efecto, el sistema posee la capacidad de emparejamiento entre los dos componentes indicados, mediante su identificación y reconocimiento, creando un enlace permanente o circuito de información en ambos sentidos entre los subsistemas, que emula el principio de la teoría física de acción y reacción, para determinar la dinámica continua del sistema Digital Twins en cuanto a los datos y a su estructura o estado.

El subsistema físico es el activo real y es el componente fundamental del gemelo digital; en ese mismo sentido, este activo se encuentra representado en toda su naturaleza, dimensión y contenido en un subsistema digital. En infraestructura vial, ese gemelo virtual puede estar representado por un modelo 3D obtenido del sistema de información geográfica - SIG y, en todo

caso, será una réplica de las instalaciones físicas en todo momento.

En su concepción tecnológica, genéricamente Digital Twins es un sistema de información soportado en recursos tecnológicos de la innovación digital propiciada por la industria 4.0, en toda su extensión. Sus componentes básicos comprenden las bases de datos, los algoritmos y software, los elementos de intercomunicación o interfaces, y los equipos o hardware de almacenamiento, procesamiento, y comunicación.

La información es capturada del mundo físico y por medio de una interfaz se presenta al usuario en un entorno cognitivo propio, a su turno los administradores o encargados de la operación del gemelo digital interactúan a través generalmente de recursos gráficos; y las facilidades ofrecidas a los usuarios reposan en un área específica con algoritmos y programas informáticos particulares para las operaciones de procesamiento y generación de resultados. Por supuesto, el sistema debe poseer la configuración física y tecnológica adecuada para manejar volúmenes importantes de datos a altas velocidades con tiempos óptimos de respuesta, y requiere de utilidades informáticas para facilitar las decisiones de alto nivel en la gestión gerencial de activos.

El gemelo digital se concibe como una representación virtual de un activo físico, en todas sus expresiones, con una interacción especial por medio de su conexión entre el subsistema real y el subsistema digital, que hace diferencia con cualquier otro modelo, en virtud a que posibilita la operación en tiempo real. Para establecer esta propiedad de interconexión, Digital Twins comprende una estructura relacional entre sus bases de datos que permite integrar y consolidar el sistema total. Este proceso a su vez faculta al subsistema virtual para interactuar con el subsistema físico, de tal manera que se cierre el circuito de información generando un enlace permanente en ambas direcciones. En todo caso, las decisiones o actuaciones que impliquen modificaciones sobre las instalaciones físicas pueden ser tomadas de forma automatizada mediante aplicaciones de inteligencia artificial y/o por medio de la intervención directa de un agente o stakeholder encargado de la gestión de activos [23].

Así mismo, el sistema en su conjunto es dinámico pues tiene la propiedad de permanecer actualizado en la medida que el subsistema físico presenta novedades derivadas de acciones propias o internas, generalmente ordenadas y/o autorizadas por el agente responsable de la gestión de activos, o por cambios originados en

externalidades que afectan el ecosistema; en ambos casos, las modificaciones son transmitidas en tiempo real al subsistema virtual para su correspondiente actualización [24].

Para recrear los componentes estructurales de un modelo Digital Twins, sus relaciones y propiedades, se presenta la siguiente ilustración (ver Figura 2).

El modelo propuesto tiene por objeto integrar la tecnología Digital Twins y los productos de la transformación digital de la industria 4.0, a la gestión gerencial de activos de infraestructura vial, para facilitar los procesos de toma de decisiones a nivel estratégico con el propósito de maximizar la generación de valor económico y social de las instalaciones físicas, creando un cambio organizacional que privilegia a la población de usuarios al proporcionar una 'mejor experiencia del cliente' en la prestación de los servicios. El desarrollo del diseño conceptual, se enmarca dentro del modelo de negocio de Participación Público-Privada -PPP- para el sector de infraestructura vial, bajo la esquema particular de Project Finance, que permite la financiación del activo fijo de vida económica extensa mediante sus flujos de caja futuros en la etapa de explotación, y cuya estructura y dinámica empresarial está basada en el análisis de los riesgos asociados con la realización del proyecto y con la operación propia del activo.

De manera específica se puede afirmar que la información constituye el recurso esencial en la gestión de activos viales, con especial ponderación en el modelo de PPA basado en el enfoque Project Finance, por razones de la propia configuración del negocio en cuanto a la amplia y variada participación de actores/stakeholders y al horizonte extenso de vida económica de la infraestructura, que a su vez requiere de una administración de riesgos estructurales en la PPP de mayor exigencia y oportunidad en materia de la gobernanza de información de los activos viales.

Ante estas condiciones, la incorporación de la tecnología Digital Twins permite satisfacer los requerimientos indicados previamente para lograr un nivel de gobernanza de datos y documentación que facilite los procesos gerenciales de toma de decisiones. En consecuencia, al integrar el gemelo digital a la gestión de activos viales en un entorno de PPA se responde objetivamente a efectuar una eficiente administración de riesgos para las partes intervinientes en esta modalidad de negocio; y en todo caso, se busca prevenir las conductas impropias de posición dominante de los agentes que puedan afectar la generación de valor de los activos viales.

El modelo conceptual diseñado comprende los componentes de Digital Twins, los procesos estratégicos para la toma de decisiones, y su integración en el ambiente de la gestión gerencial de activos viales.

En este orden de ideas, el sistema total está compuesto de dos subsistemas, uno físico o real y otro digital, que se identifican y reconocen con la misma 'data' mediante un ciclo continuo de transferencia en tiempo real, al

emular las actividades propias de la gestión gerencial de la infraestructura. En particular, el modelo conceptual representa la práctica empresarial del agente gestor/operador del activo vial con la implementación de la tecnología del gemelo digital, como se muestra a nivel conceptual en el sistema propuesto (ver Figura 3).

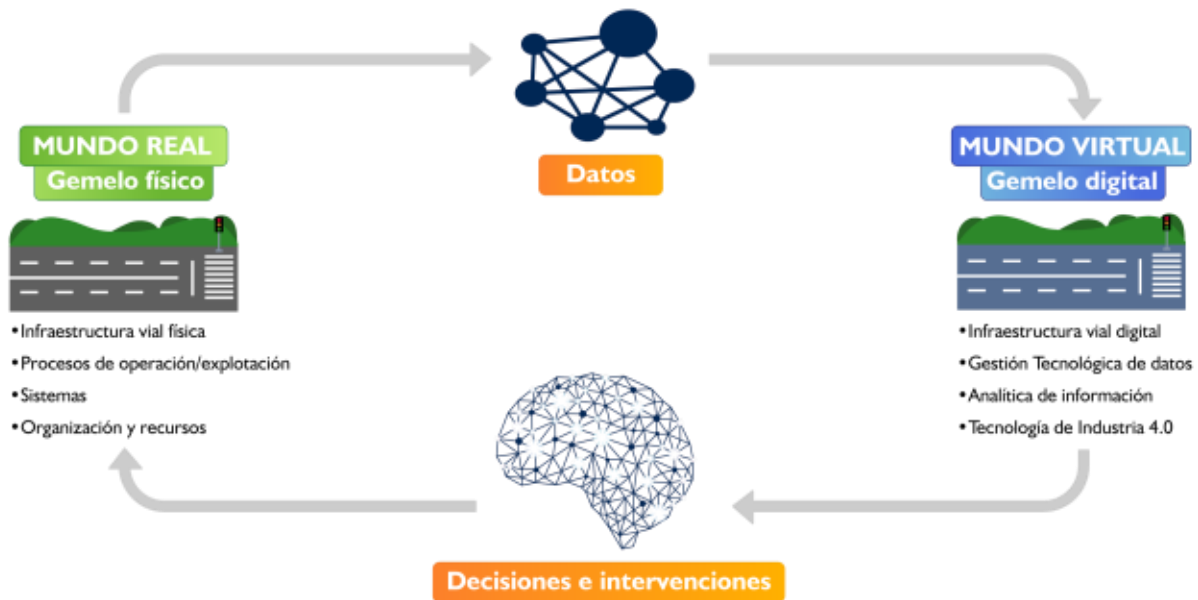


Figura 2. Estructura de un Modelo Digital Twins. Fuente: elaboración propia.

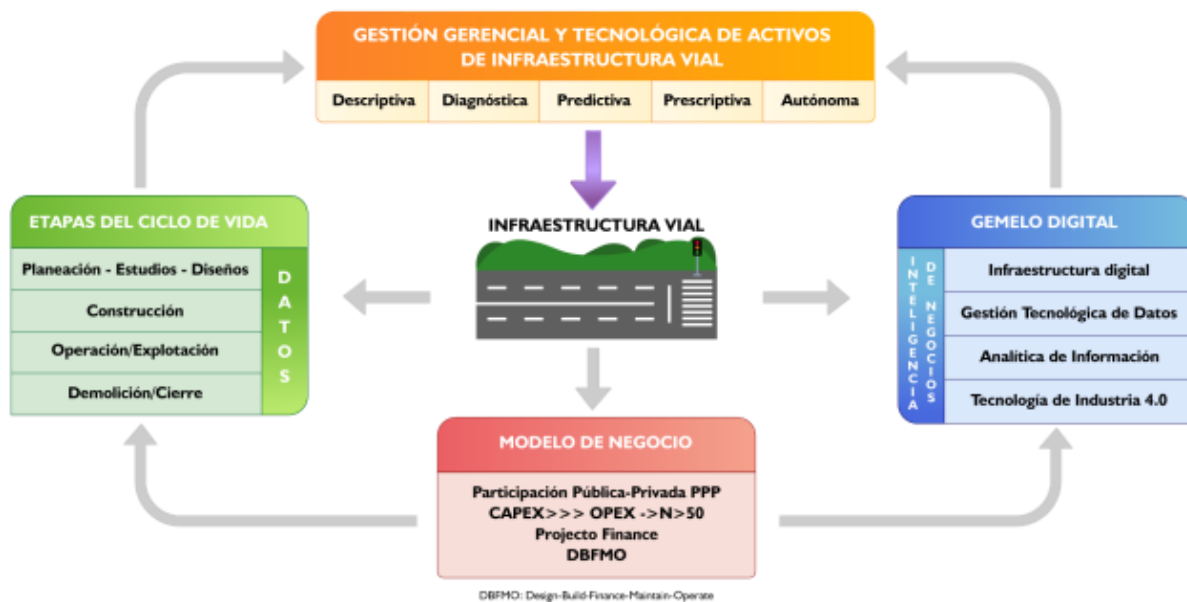


Figura 3. Diseño Conceptual de la Gestión Gerencial y Tecnológica de Activos Viales. Fuente: elaboración propia.



Los subsistemas físico y digital, además de su capacidad de sincronización, deben estar conectados con aplicaciones que facilitan las presentaciones y operaciones de las bases de datos estructuradas para favorecer los procesos de análisis y su uso en algoritmos de inteligencia artificial, orientados a tomar decisiones estratégicas -tanto autónomas como controladas o intervenidas- en la gestión de activos viales. Como quiera que estas actividades se sumergen en la tecnología, siendo el componente fundamental del sistema a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura, es importante promover un desarrollo institucional en este sector para que las organizaciones y/o agentes stakeholders avancen hacia la transformación digital y propicien el fortalecimiento de la gestión gerencial y tecnológica en beneficio de la generación de valor económico y social de la industria.

#### 4. Conclusiones

En la actualidad, los datos representan un recurso esencial en toda actividad económica, toda vez que las decisiones empresariales se basan en la información obtenida del procesamiento de la 'data'; por consiguiente, la recopilación, análisis y uso de los datos permiten tomar soluciones informadas en el ámbito de los negocios. En este contexto, emerge el concepto de Data Governance o Gobernanza de Datos/Gobernanza de Información -como la estructura empresarial requerida para garantizar la gestión de tomar y hacer cumplir las decisiones objetivas e informadas- que constituye un elemento estratégico en la organización, e involucra al talento humano, los procesos y las tecnologías de información, con el propósito de mitigar riesgos misionales y corporativos en la gestión y asegurar su integridad en todas sus formas de aprovechamiento.

En términos generales, la gobernanza de la información permite maximizar el valor de los datos, independientemente del sector económico, dimensión o tamaño, al asegurar que la información producida se utilice en forma apropiada y se proteja su conservación y autenticidad para los distintos agentes/stakeholders.

Con la transformación tecnológica de la industria 4.0, en particular con los algoritmos de aprendizaje automático e inteligencia artificial, se capturan y procesan cantidades considerables de datos que producen la información relevante para tomar decisiones y actuar en los escenarios de predicción y prescripción de la gestión de activos. Sin duda, es el "universo de la data", y en consecuencia las decisiones inteligentes demandan datos confiables y objetivos en todo sentido, sin importar la providencia del algoritmo.

En el caso particular de la infraestructura vial, la problemática actual del riesgo de pérdida sistemática del valor de la información a lo largo del ciclo de vida del activo se origina por las falencias en la gobernanza de los datos, al transitar por las diferentes etapas del horizonte económico (desde la planeación-estudios y diseños, pasando por la construcción y en la operación/explotación de las instalaciones) con la participación de diversos actores/agentes que ponderan subjetivamente sus posiciones; además de un elemento connatural en los modelos de negocio PPP con enfoque Project Finance, consistente en el extenso plazo contractual de los contratos de la alianza público-privada que exige un conocimiento integral, interdisciplinario, riguroso, continuo y agregado de las actividades. Estas circunstancias, caracterizan la situación del modelo empresarial que dificulta la gestión gerencial de los activos viales.

La convergencia del mundo físico y el virtual, al alinear la tecnología Digital Twins a la gestión gerencial de activos viales, induce a las partes interesadas/stakeholders a establecer un ambiente colaborativo en todo el ciclo de vida de la infraestructura para la generación y administración de la información, facilitando la creación de conocimiento y su aplicación en los procesos gerenciales.

La literatura es proclive y generosa a impulsar la implementación de Digital Twins en los sectores industriales de manufactura -automotriz, aeroespacial, metalmecánico-, medicina y de construcción vertical. Con esta investigación se aborda una actividad económica con requerimientos importantes en materia de transformación digital para su desarrollo empresarial y contribución a la economía en general; al efecto, el alcance resultante a nivel de diseño conceptual comprende la incorporación de la tecnología de gemelos digitales en el sector de infraestructura vial, particularmente en las actividades de concepción del sistema, captura de datos, almacenamiento y análisis de información, integración e interoperatividad con algoritmos de la industria 4.0, toma de decisiones autónomas y/o controladas/intervenidas, validación y retroalimentación de estrategias de negocios; y así, emular de manera virtual las funciones propias de la gestión gerencial y tecnológica de activos.

El diseño del modelo autónomo de gestión de activos, está integrado por tres componentes, en primer lugar por los dispositivos que capturan y transmiten los datos del mundo físico de la infraestructura para alimentar las bases de datos del sistema, en segundo término por los algoritmos de inteligencia artificial que procesan la información y producen los resultados para su

conversión en decisiones, y finalmente por la interfaz de circuito cerrado que permite interactuar entre los subsistemas virtual y físico. La interfaz se encarga de transmitir las decisiones en sentido ‘digital a real’ y actualizar la información sobre el estado y evolución del activo. A renglón seguido, de forma circular, se vuelve a capturar los datos físicos y se actualiza el gemelo digital, para continuar con el proceso automatizado del modelo.

El modelo conceptual presentado incorpora la capacidad tecnológica de Digital Twins a la gestión gerencial de activos de infraestructura vial, para modelar una solución empresarial que propenda por optimizar los procesos de toma de decisiones estratégicas, mediante la transformación digital como respuesta a los riesgos de gobernanza de la información a lo largo del ciclo de vida de los activos viales, en los modelos de negocio de participación público-privada PPP y en la modalidad de Project Finance; en tal sentido, se propone esta integración tecnológica para maximizar la generación de valor de las instalaciones, en términos económicos, sociales y de desarrollo sostenible.

La tecnología Digital Twins alineada con la gestión de activos viales ofrece interesantes oportunidades para contribuir en las soluciones estratégicas de la infraestructura de transporte, en todas las etapas de su ciclo de vida, logrando mayores niveles de eficiencia económica y de sostenibilidad integral del modelo de negocio -en este caso de PPP-; al mismo tiempo, está circunstancia plantea importantes retos al sector en materia de transformación digital y de inteligencia de negocios -Business Intelligence-, con la finalidad apremiante de optimizar la prestación de los servicios y mejorar la calidad de vida de la población en general.

El diseño conceptual propuesto proporciona una base de conocimiento para adelantar el diseño de ingeniería básica, previamente a la ingeniería de detalle, del modelo de gestión gerencial y tecnológica de activos viales, que finalmente permita avanzar en la senda del paradigma de “Smart Roads”, mediante la integración de la tecnología de gemelos digitales y las innovaciones de inteligencia artificial de la industria 4.0 al sector económico de infraestructura vial.

#### **Financiación**

No aplica.

#### **Contribución de los autores**

G. Pedraza-Jaimes: conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología,

redacción –borrador original. J. Camacho-Pico: metodología, validación, visualización, redacción –revisión y edición. H. Porrás-Díaz: conceptualización, supervisión, metodología, validación, visualización, redacción –borrador original, redacción –revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

#### **Conflicto de interés**

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

#### **Declaración de la Junta de Revisión Institucional**

No aplica.

#### **Declaración de consentimiento informado**

No aplica.

#### **Referencias**

- [1] G. Choclán, M. Soler, R. González, “Introducción a la metodología BIM”, *Spanish Journal of Building Information Modeling.*, vol. 1, no.14, pp. 4-10, 2014.
- [2] B. Fuentes, Impacto de BIM en el proceso constructivo español. Málaga, España: Servicios y comunicación LGV S.L., 2014.
- [3] S. Azhar, M. Hein, B. Sketo, “Building Information Modeling (BIM): Benefits, Risks and Challenges”, *McWhorter School of Building Science*, Auburn University, 2008.
- [4] H. Sleiman, L. Burdi, “BIM Guidelines for vertical and horizontal construction”, *Massachusetts Port Authority. Capital Programs and Environmental*, vol. 1, no. 4, pp. 1–72, 2015.
- [5] T. Serebrisky, A. Suarez-Alemán, D. Margot, M. Ramírez, “Financing Infrastructure in Latin America and the Caribbean: How, ¿How Much and by Whom?”, *IDB*, vol 1, pp. 1-30. 2015, doi: <https://doi.org/10.18235/0000212>
- [6] J. F. Bravo, “Financiación de proyectos de infraestructura vial de cuarta generación (4g) en Colombia”, trabajo fin de master, Departamento de Economía, Universidad de los Andes, 2015.

- [7] J. Gémez., “BIM for management and maintenance”, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.bimcommunity.com/news/load/230/bimpar-a-la-gestion-y-el-mantenimiento>
- [8] B. Hardin, D. McCool, *BIM and Construction Management*. Estados Unidos: Wiley, 2015.
- [9] Deusto Formación, “¿Qué es y para qué sirve el modelado paramétrico en la tecnología Bim?”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.deustoformacion.com/blog/bim-autocadrevit/que-es-para-que-sirve-modelado-parametricotecologia-bim>
- [10] N. Kartam, R. Levitt, “Intelligent Planning of Construction Projects”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 155–176, 1990, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)08873801\(1990\)4:2\(155\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)08873801(1990)4:2(155))
- [11] M. Toro, “La Planificación: Características y Desarrollo del Proceso Resumen”, Políticas de Planificación y Supervisión Educativa, Universidad Santa María, 2012.
- [12] O. Van Damme, H. Van Geelen, P. Courange, “The Evaluation of Road Infrastructure Development Projects”, *Transportation Research Procedia*, vol. 14, pp. 467–473, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.099>
- [13] Área de Proyectos del ILPES/CEPAL, “Guía Metodológica para la Identificación, Formulación y Evaluación de Proyectos de Infraestructura Vial en Costa Rica”, Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, San José, 2012
- [14] M.C. Mazuera, “Gerencia de Planeación Para la Infraestructura Vial Nacional”, monografía, Universidad Militar Nueva Granada, 2014.
- [15] J. Fountain, S. Langar, “Building Information Modeling (BIM) outsourcing among general contractors” *Automation in Construction*, vol. 95, pp. 107–117, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.009>
- [16] M. Albis, “Ciclos y fases de la identificación de proyectos”, Universidad del Norte, 2012.
- [17] L. Sierra., “Gestión de proyectos de construcción con metodología BIM (Building Information Modeling)”, monografía, Universidad Militar Nueva Granada, 2016.
- [18] The Institute of Asser Management, “The SelfAssessment Methodology Plus”, 2015.
- [19] M. Macchi, I. Roda, E. Negri, L. Fumagalli, “Exploring the role of Digital Twin for Asset Lifecycle Management”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 790-795, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.415>
- [20] F. Tao, M. Zhang, Y. Liu, A. Nee, “Digital twin driven pronostics and health management for complex equipment”, *CIRP Annals*, vol. 67, no. 1, pp. 169-172, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.055>
- [21] Committee of Transport Officials (COTO), “Draft TMH 22: Road Asset Management Manual”, South Africa, 2013.
- [22] M. Ouertani, A. Parlikad, D. Mcfarlane, “Towards an Approach to Select an Asset Information Management Strategy”, *International Journal of Computer Science and Applications*, vol. 5, no. 3, pp. 25 - 44, 2008.
- [23] D. Broo, J. Schooling, “Digital twins in infrastructure: definitions, current practices, challenges and strategies”, *International Journal of Construction Management*, vol. 23, no. 7, pp. 1254–1263, 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1966980>
- [24] Y. Tchana, G. Ducellier, S. Remy, “Designing a unique Digital Twin for linear infrastructure lifecycle management”, *Procedia CIRP*, vol. 84, pp. 545-549, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.176>
- [25] A. Hevner., “A Three Cycle View of Design Science Research”, *Scandinavian Journal of Information Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 87-92, 2007, doi: <https://aisel.aisnet.org/sjis/vol19/iss2/4/>
- [26] A. Hevner., et al., “Design Science in Information Systems Research,” *MIS Quarterly*, vol. 28, no. 1, pp. 75-105, 2004, doi: <https://doi.org/10.2307/25148625>