

Nivel de madurez de gemelos digitales aplicados a inmuebles con valor cultural: el foyer y fumadores del Teatro Nacional de Costa Rica

Maturity level of digital twins applied to buildings with cultural value: the foyer and smoking rooms of the National Theater of Costa Rica

Jose Pablo Bulgarelli-Bolaños¹, Ileana Hernández-Salazar², Manuel Castellano-Román³

Bulgarelli-Bolaños, J.P; Hernández-Salazar, I; Castellano-Román, M. Nivel de madurez de gemelos digitales aplicados a inmuebles con valor cultural: el foyer y fumadores del Teatro Nacional de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° especial. Octubre, 2025. Escuela de Arquitectura y Urbanismo. TEC. Pág. 84-95.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i7.8292>

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 jpbulgarelli@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5476-6544>

² Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 ihernandez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2355-0270>

³ Universidad de Sevilla. España.
 manuelcr@us.es
 <https://orcid.org/0003-4787-447X>



Palabras clave

Conservación programada; patrimonio arquitectónico; herramientas de gestión; custodio.

Resumen

En la presente comunicación se describen los resultados del proceso en el cual se definió el grado de madurez de un Gemelo Digital (GD) para bienes inmuebles con valor cultural. Uno de los productos del proyecto de investigación “Gemelo digital como herramienta de gestión del plan de conservación programada. Caso de estudio: foyer y fumadores del Teatro Nacional de Costa Rica” fue la definición de los requisitos y alcance para el futuro desarrollo del GD. Se llegó a la determinación de que este nivel podrá ser comunicativo con funcionalidades interactivas. La metodología incluye un análisis documental de la producción científica publicada desde el 2019 y hasta el 2024 sobre el tema, en revistas indexadas en *Web of Science* y *Scopus*, en el marco de la industria de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción; resultados que fueron contrastados con las expectativas del custodio del caso de estudio y los principales riesgos identificados. Con base en esto y en función de la tecnología accesible al momento de la investigación, se especificó el nivel de madurez que el equipo de investigación definió como el nivel posible de alcanzar en el proceso de desarrollo de la herramienta.

Keywords

Programmed conservation; architectural heritage; management tools; custodian.

Abstract

This paper describes the results of the process with which it was possible to define the degree of maturity of a Digital Twin (DT) for real estate with cultural value, determining that this level can be communicative with interactive functionalities; this within the framework of a research project, whose case study is the foyer and smokers of the National Theater of Costa Rica, where one of its results was the definition of the requirements and scope for the future development of the DT. The methodology includes a documentary analysis of the scientific production published from 2019 and until 2024 on the subject, in journals indexed in Web of Science and Scopus, within the framework of the Architecture, Engineering and Construction industry; results that were contrasted with the expectations of the custodian of the case study. Based on this and according to the technology available at the time of the research, the maturity level that the research team defined as the possible level to reach in the tool development process was specified.

Introducción

La presente comunicación se encuentra vinculada con la investigación “Gemelo digital como herramienta de gestión del plan de conservación programada. Caso de estudio: foyer y fumadores del Teatro Nacional de Costa Rica”. El objetivo principal del proyecto fue desarrollar las primeras etapas del Plan de Conservación Programada (PCP) aplicando la propuesta de protocolo en el caso de estudio: foyer y fumadores del Teatro Nacional de Costa Rica, cuya información fuese la base para la futura creación de un Gemelo Digital como herramienta de gestión del bien patrimonial. El proyecto definió los requerimientos técnicos y de visualización para el desarrollo de un Gemelo Digital del foyer y fumadores del Teatro Nacional de Costa Rica (TNCR). El equipo de investigación estuvo integrado por el Tecnológico de Costa Rica (TEC) y el TNCR.

En este artículo se describen los resultados del proceso para definir el nivel de madurez propuesto para Gemelos Digitales (GD) aplicables en el monitoreo de bienes inmuebles patrimoniales, a partir de la revisión de la producción científica sobre el tema entre los años 2019 y 2024, las expectativas de los custodios⁴ del caso de estudio y la capacidad tecnológica al momento de la definición de los requerimientos técnicos para el futuro desarrollo de la herramienta. En esta línea, el equipo de investigación definió que el grado de madurez de los GD para el monitoreo de bienes inmuebles con valor cultural debería ser tipo comunicativo con funcionalidades interactivas.

Para comprender las razones que motivan esta decisión, es necesario definir qué se entiende por Conservación Programada (CP) y por Gemelo o Gemelos Digitales (GD) y el papel de esta herramienta tecnológica en los procesos de CP. El principal autor que teoriza sobre la CP es el arquitecto e ingeniero Stefano Della Torre [1], a partir de su trabajo, en el documento [2] se interpreta a la CP como un proceso continuo y sostenido a través del cual se planifican y ejecutan las acciones requeridas para garantizar un estado específico de conservación del objeto arquitectónico o sitio histórico, con el propósito de preservar los valores que justifican sus niveles de protección.

Los procesos de CP consideran el contexto físico y la evolución del edificio en el tiempo, evalúan su estado actual identificando vulnerabilidades y planifican su preservación con una perspectiva orientada al largo plazo [3], siendo esta la principal diferencia con la conservación preventiva, que se basa en el paradigma del mantenimiento, sin considerar los ciclos de monitoreo ligados a las fragilidades identificadas en el bien. En este sentido, el avance tecnológico desempeña un papel fundamental es los procesos de CP, ya que facilita el monitoreo del inmueble, así como la supervisión de las acciones establecidas en un Plan de Conservación Programada (PCP) [2].

Dicho Plan incluye, además del modelado digital mediante metodología HBIM, el diagnóstico, diseño y ejecución de las intervenciones, la implementación de un sistema centralizado de información [2] que recopila, organiza y presenta los datos relacionados a variables de monitoreo vinculadas a los riesgos del edificio, permitiendo no solo el seguimiento del PCP, sino también la toma de decisiones basadas en el control de los factores que afectan la conservación del bien inmueble.

Por otra parte, en cuanto a los GD aplicados en el ámbito del patrimonio cultural, Lucchi [4] los define como herramientas que simulan el comportamiento de los objetos en entornos virtuales, generando un modelo multifísico de actualización constante gracias a los datos monitorizados automáticamente [4]. En esta línea el equipo de investigación del proyecto define al GD en patrimonio, como una plataforma de información centralizada que combina, en un modelo HBIM, la geometría del edificio con los datos recolectados a través de sensores instalados en el bien [5]. El objetivo de este GD es permitir la interpretación de la información de las variables de monitoreo mediante la comparación de indicadores con rangos de tolerancia en un tiempo determinado, facilitando la toma de decisiones para controlar las condiciones que afectan la conservación del bien inmueble [5].

Las funciones del GD dependen del nivel de madurez de la herramienta; la categorización del grado de desarrollo está vinculada con la cantidad y tipo información que puede almacenar, cómo esta se visualiza, la interacción del usuario con la herramienta y si la información es o no analizada previamente por el sistema. A su vez, todas estas variables se ven limitadas por el tipo de tecnología disponible para el diseño y construcción el GD. Es decir, el desarrollo de un GD en el ámbito del patrimonio cultural no solo considera las necesidades del custodio consignadas en el PCP, si no que depende del balance entre las expectativas del usuario y los recursos tecnológicos disponibles para el diseño y construcción de la herramienta.

4 Entiéndase por “custodio” a la persona física o jurídica responsable de la conservación del bien inmueble patrimonial.

Según la revisión de la literatura científica actual, los GD en la industria de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AIC) se encuentran en los primeros cuatro niveles de seis posibles [6], pero se debe considerar que estos niveles de madurez no son necesariamente lineales, por tanto, un GD puede contar con características propias de orden superior antes que de un orden inferior [7]. Considerando lo anterior, a continuación, se presenta el análisis de la literatura, así como los resultados de la expectativa del custodio del caso de estudio y los riesgos identificados, elementos base para la definición del nivel de madurez y los requisitos técnicos para el futuro desarrollo de un GD.

Materiales y métodos

El equipo de investigación analizó la producción científica publicada desde el 2019 y hasta el 2024, en revistas indexadas en *Web of Science* y *Scopus*, en el marco de la industria de la AIC. Las palabras clave empleadas para la búsqueda fueron: “*Digital Twin*, *Maturity Level*, *Architectural Heritage*”, registrando un total de 136 documentos. De este resultado se seleccionaron aquellos aportes que explícitamente categorizaban los niveles de madurez de Gemelos Digitales en la industria AIC o específicamente en el sector del patrimonio arquitectónico, según lo propuesto por [4], [6], [7], [8] y [9].

Los niveles de madurez definidos por estos autores se compararon según las funcionalidades, tecnología vinculada con la herramienta, tipo de información requerida y nivel de conocimiento del modelo HBIM [10] ligado al GD. A partir de esta comparación se propuso una categorización de los niveles de madurez para GD aplicados en la conservación programada de bienes inmuebles patrimoniales.

Por otra parte, se realizó un análisis de los riesgos presentes en el foyer y fumadores del TNCR. Este trabajo se planteó en dos etapas, la primera fue desarrollada como una labor conjunta entre el equipo TEC y el TNCR. Mediante dos talleres participativos con el Departamento de Conservación del TNCR, se llevó a cabo un proceso para definir los principales valores asociados al objeto de estudio, la necesidad de conservarlos, identificar los lineamientos de intervención existentes y establecer el índice de vulnerabilidad del inmueble tomando como base la experiencia del personal de dicho departamento.

En el primer taller, realizado el 22 de febrero del 2023, se identificaron y discutieron los valores que las personas participantes consideraban que tiene el TNCR, basándose en lo estipulado por la Guía para la Carta de Burra: Valor Cultural, de 1997. Posteriormente, se revisaron y discutieron los lineamientos de intervención presentes en los documentos de los proyectos activos del Teatro y por último se evaluó, mediante un formulario digital, la posible vulnerabilidad del inmueble a partir de cuatro dimensiones (sistemas, entorno, uso y presión urbana). En el segundo taller, del 3 de mayo de 2023, se revisaron y ajustaron los resultados obtenidos en la primera actividad participativa y mediante preguntas abiertas se profundizó en conocer la expectativa del custodio con respecto al GD, específicamente sobre las funciones de la herramienta de acuerdo con las necesidades de conservación, la trazabilidad de las intervenciones, los niveles de responsabilidad asociados a las labores de los miembros del departamento y los recursos existentes.

La segunda etapa del análisis de riesgos contempló una serie de visitas al sitio para identificar lesiones y asociarlas al elemento arquitectónico u ornamental en el que se encontraban; esta información se registró en los planos y bases de datos del proyecto. A cada lesión se le aplicaron una serie de criterios de análisis con el objetivo de determinar las prioridades a atender de acuerdo con los valores definidos y establecer las variables de monitoreo que podrían considerarse en el diseño y desarrollo de un GD. Los criterios analizados fueron: origen de la lesión o posibles causas, frecuencia con la que se podían presentar las condiciones de origen, riesgo o consecuencia -a corto, medio y largo plazo- de mantenerse las condiciones de origen, impacto de dicho riesgo sobre los valores del objeto de estudio, medios o alternativas

para registrar las condiciones de origen, equipo tecnológico disponible y deseable para monitorear las variables asociadas al origen de las lesiones, el formato en el que cada equipo registra la información y la frecuencia óptima para efectuar la captura de datos de medición.

Al finalizar ambas etapas, la información obtenida se socializó en sesiones de trabajo conjunto entre el equipo TEC y las personas encargadas del Departamento de Conservación del TNCR. De esta manera se logró realizar la priorización de las variables que inciden sobre los principales riesgos identificados en el área de estudio, en función de su afectación sobre los valores a conservar. A partir de lo anterior, junto con la expectativa del custodio para el uso de la herramienta y el equipo tecnológico disponible para la toma de datos, se logró la determinación de las posibles funcionalidades del GD y se estableció el nivel de madurez esperado.

Resultados

A partir de la investigación documental se seleccionaron cuatro textos en los cuales se describe explícitamente una categorización de los niveles de madurez de los GD en la industria AIC o en el sector del patrimonio construido; a continuación, se narra el trabajo de [8], [6], [9] y [4].

Chen et al. [8] proponen un modelo cualitativo para medir, evaluar y comparar el nivel de madurez en la implementación de GD en el sector AIC, considerando seis etapas o niveles de desarrollo. El modelo se basó en la guía “Activos inteligentes para las infraestructuras del mañana”, del Instituto de Ingeniería Civil de Reino Unido, y está estructurado en un sistema de coordenadas triaxial, basado en las tres dimensiones en que se debería considerar la madurez de los GD: propósito, confianza y funciones [8], además incorpora un formulario de evaluación para identificar la etapa o nivel de desarrollo.

Botín-Sanabria et al. [6] realizan una revisión bibliográfica exhaustiva sobre la tecnología de GD, abordando sus retos, limitaciones y principales aplicaciones. Como parte de los hallazgos, identificaron los tipos de GD, sus niveles de integración, el espectro de madurez y los avances en diferentes dominios. Para los niveles de madurez, adoptaron la clasificación propuesta por Evans et al. [7], detallando los niveles, principios y posibles usos.

Por otro lado, Wei et al. [9] desarrollaron un modelo de GD específicamente para la construcción fuera del emplazamiento (*Off-site*) con paneles, junto con una herramienta de evaluación denominada *Off-site Construction Digital Twin Maturity Level* (OCDTML). Sus objetivos incluyen identificar las diferencias entre los GD de la industria manufacturera y de la construcción *Off-site*, diseñar un modelo de GD para este tipo de construcción, desarrollar un marco de evaluación basado en el modelo y validarlos -marco y modelo- mediante entrevistas y pruebas empíricas.

Por otra parte, Lucchi [4] realiza un análisis de publicaciones científicas centrándose en las aplicaciones de Gemelos Digitales en el sector del patrimonio, a partir de este análisis la autora identifica las aplicaciones típicas de los GD en el patrimonio cultural construido, los retos del desarrollo de estas herramientas, los niveles de madurez según sus características y las líneas de investigación futuras en torno al tema. Según el análisis realiza una categorización de los niveles de madurez para GD aplicados en la conservación programada de bienes inmuebles patrimoniales basada en las funcionalidades esperadas, las tecnologías integradas en la herramienta, los usos HBIM y el nivel de conocimiento [11] del modelo HBIM, como base para la integración de información en la herramienta.

A partir de la revisión y análisis de lo propuesto en los artículos mencionados, es posible sintetizar lo sugerido por los autores en una categorización de los niveles de madurez de los Gemelos Digitales para el patrimonio cultural construido. Los niveles establecidos han sido seis: el Nivel 0-Predigital, el Nivel 1-Identifiable, el Nivel 2-Consciente, el Nivel 3-Comunicativo, el Nivel 4-Interactivo y el Nivel 5-Instructivo e Inteligente. Se han identificado para cada nivel

las funciones del GD, el tipo de información requerida, la tecnología vinculada y el nivel de conocimiento del modelo HBIM. A continuación, se presenta del cuadro 1 hasta el cuadro 6 dicha categorización.

Cuadro 1. Nivel 0 Predigital (sin conocimiento).

Descripción	Funciones	Tipo de información requerida	Tecnologías ligadas	Nivel de conocimiento HBIM
No existe un GD tal cual, se entiende como un registro del activo, sin integración de <i>Internet of things</i> (IoT) ni bases de datos estructuradas.	Captura de datos básicos, base para la creación de modelos CAD estáticos sin integración de datos en tiempo real, documentación geométrica y levantamiento “as-built”, mitigación de riesgos técnicos mediante modelos predigitales.	Datos geométricos básicos del activo obtenidos de forma manual o por medio de instrumentos digitales, estos datos no requieren estar estructurados o pueden estar parcialmente organizados.	Dibujos o esquemas manuales, nube de puntos, drones, fotogrametría, CAD 2D, bases de datos no integradas.	LOK100, este modelo permite la identificación del bien patrimonial y su caracterización básica, en nivel de precisión gráfica que alcance no es fundamental.

Fuente: elaboración propia, basado en [4], [6], [7], [8], [9] y [11].

Cuadro 2. Nivel 1 Identificable (Básico).

Descripción	Funciones	Tipo de información requerida	Tecnologías ligadas	Nivel de conocimiento del modelo HBIM
Los activos son parcialmente identificables y registrados. Se comienza a vincular datos descriptivos con la identidad del activo, pero sin metadatos avanzados ni integración de IoT.	Vinculación de datos descriptivos con la identidad del activo, creación de modelos tridimensionales básicos, comprensión y coordinación del activo, reconstrucción de modelos virtuales mediante técnicas de escáner 3D y drones.	Datos vinculados a la identidad del activo, modelos tridimensionales sin metadatos avanzados, información de escáner láser y fotogrametría para reconstrucción virtual, datos iniciales para la comprensión y coordinación del activo. Tecnologías ligadas: modelos tridimensionales básicos, escáner 3D, drones, nube de puntos, software CAD básico.	Modelos tridimensionales HBIM básicos, escáner 3D, drones, nube de puntos, software CAD básico.	LOK 200, este nivel permite la caracterización gráfica y la información necesaria para el desarrollo de acciones vinculadas a la protección legal del inmueble y la planificación de su gestión.

Fuente: elaboración propia, basado en [4], [6], [7], [8], [9] y [11].

Cuadro 3. Nivel 2 Consciente (Intermedio).

Descripción	Funciones	Tipo de información requerida	Tecnologías ligadas	Nivel de conocimiento del modelo HBIM
Los activos son identificables y registrados, además, contempla la monitorización parcial y simulaciones avanzadas.	Integración parcial de dispositivos IoT para supervisar condiciones existentes, uso de modelos digitales con datos persistentes y metadatos básicos, simulación 4D/5D para la planificación y gestión de proyectos de intervención, monitorización de condiciones ambientales y detección de fallos simples.	Datos persistentes (estáticos) y metadatos básicos, información de dispositivos IoT parcialmente integrados, datos para simulaciones 4D/5D (tiempo y costo), información ambiental (temperatura, humedad, entre otros) y rendimiento energético.	Modelo HBIM, LoT básico, sensores, bases de datos vinculadas a modelos, espacio común de trabajo y modelos vinculados.	LOK300, profundiza la caracterización de las entidades gráficas, pudiendo mostrar resultados de investigaciones especializadas, para el seguimiento y diagnóstico.

Fuente: elaboración propia, basado en [4], [6], [7], [8], [9] y [11].

Cuadro 4. Nivel 3 Comunicativo (Avanzado).

Descripción	Funciones	Tipo de información requerida	Tecnologías ligadas	Nivel de conocimiento del modelo HBIM
Existe la interoperabilidad entre sistemas y una gestión predictiva, y tecnología se implanta de forma razonable, con enriquecimiento de datos.	Definición de ontologías para compartir datos en formatos normalizados, enriquecimiento de modelos con datos en tiempo real mediante IoT y sensores, gestión de mantenimiento predictivo y eficacia operativa, construcción de modelos HBIM con metadatos y datos paramétricos.	Datos en tiempo real provenientes de sensores IoT, ontologías definidas para normalizar el intercambio de información, metadatos avanzados y datos paramétricos para modelos HBIM, información para la gestión de mantenimiento predictivo y eficacia operativa.	LoT avanzado, sensores en tiempo real, protocolos de interoperabilidad, modelos HBIM con metadatos.	LOK400, modelo avanzado al que se le vinculan acciones específicas de conservación e intervención sobre los elementos del bien patrimonial.

Fuente: elaboración propia, basado en [4], [6], [7], [8], [9] y [11].

Cuadro 5. Nivel 4 Interactivo (Inteligente).

Descripción	Funciones	Tipo de información requerida	Tecnologías ligadas	Nivel de conocimiento del modelo HBIM
GD con interacción bidireccional y control remoto. Se aplican metodologías avanzadas para la recuperación de información y la integración de activos.	Integración e interacción bidireccional de datos entre lo físico y lo virtual, operaciones remotas e inmersivas, permitiendo controlar lo físico desde lo digital, monitorización continua y adaptación en tiempo real mediante sensores IoT, optimización de procesos constructivos y gestión autónoma de infraestructuras.	Datos bidireccionales entre lo físico y lo virtual, información en tiempo real para operaciones remotas e inmersivas, datos de monitorización continua y adaptación en tiempo real, información para la optimización de procesos constructivos y gestión autónoma.	LoT avanzado, sistemas ciber-físicos, integración con plataformas Cloud, plataformas integradas BIM-IoT, visualización inmersiva (VR/AR).	LOK500, esto modelos permite una gestión del inmueble, registrando las diferentes acciones previstas.

Fuente: elaboración propia, basado en [4], [6], [7], [8], [9] y [11].

Cuadro 6. Nivel 5 Instructivo e Inteligente (Autónomo).

Descripción	Funciones	Tipo de información requerida	Tecnologías ligadas	Nivel de conocimiento del modelo HBIM
GD semiautónoma o autónoma completa y mejora continua, con apoyo inteligente a la toma de decisiones y acciones instigadoras.	Gestión semiautomática o automática de activos, con apoyo inteligente a la toma de decisiones, operación y mantenimiento autónomos con supervisión y transparencia, aprendizaje continuo y mejora adaptativa mediante técnicas de IA avanzada, innovación disruptiva en diseño, construcción y gestión de infraestructuras.	Datos autónomos y continuos para la gestión semiautomática o automática de activos, información para el aprendizaje continuo y la mejora adaptativa mediante IA, datos para la operación y mantenimiento autónomos con total supervisión y transparencia, información disruptiva para la innovación en diseño, construcción y gestión.	IA avanzada, aprendizaje por refuerzo, analítica avanzada, sistemas autónomos.	LOK500

Fuente: elaboración propia, basado en [4], [6], [7], [8], [9] y [11].

Definida esta clasificación de niveles de madurez, se contrastó con los requerimientos del custodio y las variables de monitoreo, para definir el nivel de madurez necesario del GD del caso de estudio. Por otro lado, a partir del proceso participativo entre el personal del Departamento de Conservación del TNCR y el equipo TEC se logró determinar los principales valores del objeto de estudio que deben considerarse en la propuesta de un GD.

Como resultado se identificaron los valores estético, histórico, cultural, científico y social como los más importantes, se destacó la singularidad del Teatro en el ámbito nacional, su representatividad como elemento de la identidad costarricense, su presencia como reflejo de un momento histórico y su papel como un espacio vivo que genera actividad cultural. Además, se resaltó su trascendencia como “escuela de oficios”, ya que es uno de los pocos inmuebles históricos donde las personas funcionarias aprenden sobre técnicas tradicionales de conservación y de la dinámica teatral.

Con respecto a los lineamientos para la conservación se logró determinar la necesidad de establecer aspectos generales para el control de las intervenciones que se realizan en el inmueble, definir restricciones para no alterar los valores del edificio, hacer énfasis sobre la compatibilidad de los materiales a utilizar y la necesidad de lograr la trazabilidad de las acciones de intervención. Por otra parte, se requiere profundizar en los lineamientos para la adaptación de las instalaciones y servicios al cumplimiento de las normativas de accesibilidad, protección contra incendios y la adaptación a nuevas tecnologías. Además, se evidenció que existen protocolos para el tratamiento de ornamentos, sin embargo, los arquitectónicos y estructurales requieren mayor atención, dado que se trata de aspectos generales que no detallan en la dinámica de conservación del patrimonio desde una visión integral, enfocada en preservar los valores del Teatro. Se enfatizó en la necesidad de que las intervenciones se mantengan bajo criterios de reversibilidad, durabilidad y compatibilidad, además de que tanto la operación del edificio, los usos, la capacidad de carga, así como las intervenciones futuras se ríjan por protocolos estrictos para evitar daños en los elementos arquitectónicos y ornamentales.

Una vez realizado el análisis de las lesiones existentes se logró determinar cuáles tienen un potencial más alto para generar deterioro en los elementos arquitectónicos y ornamentales y por tanto afectar directamente en la conservación de los valores del objeto de estudio. Al identificar las lesiones más críticas fue posible establecer su relación con variables medioambientales y de uso, tales como humedad relativa y humedad del material, contaminación atmosférica, agentes biológicos, temperatura e incidencia solar, vibraciones o manipulación indebida, entre otros. Además, se logró priorizar aquellas variables que deben monitorearse ya sea mediante inspección visual o instrumental, de acuerdo con la disponibilidad de los equipos y la capacidad operativa del TNCR.

Para el monitoreo visual se registraron lesiones cuyos cambios físicos fueran medibles y cuantificables por medio del uso de instrumentos, en este rubro se identificaron daños relacionados con la aparición de manchas, eflorescencias, fisuras, grietas, deshidratación y desintegración de material. Si bien estas lesiones tienen un potencial de impacto considerable sobre los valores estéticos del inmueble, se descartó vincular el monitoreo visual a una primera versión del GD, ya que supone retos operativos superiores al alcance del proyecto y, por tanto, deberá analizarse a futuro la manera de lograr su integración a la herramienta.

En cuanto al monitoreo instrumental las variables como temperatura ambiental, humedad relativa, iluminación incidente y presencia de partículas en el ambiente guardan relación directa con la mayor parte de las lesiones identificadas en el área de estudio, tales como fisuras, deshidratación, corrosión y alteraciones cromáticas, además se cuenta con equipos para registrar datos y vincularlos a un futuro GD. Por otra parte, variables como humedad en

el material, vibración y desplazamiento deberán analizarse para su incorporación en futuras versiones del GD, ya que a la fecha no se cuenta con equipos ni recurso humano suficiente para realizar el registro de estos datos.

Evitando alterar el valor estético del Teatro, así como por las características de los materiales de acabado, es fundamental el uso de técnicas no invasivas para la recolección de información, por tanto, las variables definidas se asociaron a espacios generales y no a elementos arquitectónicos u ornamentales de manera puntual. Es necesario que los sensores IoT se instalen en áreas designadas del foyer -norte, central y sur de acuerdo con la clasificación previa realizada por el equipo de investigación- y en los Fumadores norte y sur.

Consideradas las funciones y el tipo de información requeridas por el custodio y los recursos tecnológicos disponibles o en disposición de proveerse, puede inferirse que el nivel de madurez requerido para el GD del TNCR es el Nivel 3-Comunicativo, que necesitaría ser complementado con algunas funcionalidades interactivas del nivel 4.

Conclusiones

Aunque se trata de un solo edificio, cada estancia del TNCR tiene particularidades propias relacionadas con su funcionamiento, capacidad, ornamentación y uso, estas características las hacen más o menos sensibles a factores como ventilación, iluminación, ocupación, mobiliario, entre otros, por tanto, es necesario establecer lineamientos específicos para la conservación de cada espacio, así como una monitorización y gestión individualizada que considere sus particularidades. Dichos lineamientos deben ser accesibles tanto para el custodio del bien como para las personas encargadas de llevar a cabo labores de intervención en los distintos elementos, por tanto, es importante contar con una plataforma que centralice la información y que permita sistematizar las evidencias resultantes de la aplicación de los lineamientos.

Del análisis de las lesiones presentes en el área de estudio, los equipos tecnológicos y el recurso humano disponible se consolida la necesidad de contar con una herramienta que contribuya con la gestión del inmueble, de manera que pueda monitorear las variables que inciden en su estado de conservación, dar trazabilidad a las acciones de intervención y alertar sobre procesos de deterioro. Las variables de monitoreo por considerar en un primer prototipo de GD; según el tipo de lesiones presentes, los equipos existentes y el personal capacitado; son la temperatura ambiente, la humedad relativa, la cantidad de iluminación incidente y la presencia de partículas en el ambiente. El TNCR cuenta con datalogger capaces de registrar información de estas variables, por tanto, el equipo de investigación debe desarrollar un modelo de datos que relacione la geometría de los modelos digitales elaborados por el proyecto, con información recopilada por los sensores instalados, facilitando la visualización de escenarios basados en las mediciones y sus posibles afectaciones.

En función de lo mencionado anteriormente, el equipo de investigación ha desarrollado los requisitos técnicos para el futuro desarrollo de un GD del foyer y fumadores del TNCR. Considerando que el nivel de madurez del GD proyectado es de tipo comunicativo y funcionalidades interactivas, este permitirá la integración de modelos tridimensionales con conjuntos de datos recopilados mediante sensores IoT, en tiempo real o en momentos específicos. Además, este nivel de madurez del GD permite el monitoreo de las condiciones del objeto físico, a partir de los cambios en los indicadores y los valores de referencia definidos por períodos para cada material.

Partiendo de este modelo como base, se espera que la plataforma incorpore funcionalidades avanzadas de comunicación y gestión de datos. Para ello, se debe implementar una ontología, es decir, un modelo estructurado de datos que define un conjunto de conceptos y sus relaciones,

con el fin de garantizar la interoperabilidad de la información en formatos estandarizados. Además, se deberá integrar información en tiempo real o en períodos específicos mediante el uso de tecnologías IoT y sensores, lo que permitiría enriquecer y actualizar continuamente los modelos HBIM.

Asimismo, se prevé que la herramienta cuente con funcionalidades interactivas que faciliten la integración e interacción entre el entorno físico y el virtual. Esto incluye la capacidad de visualizar alertas cuando las variables monitoreadas muestren valores que puedan propiciar la aparición de lesiones en el objeto de estudio. Una vez detectada la presencia de una o varias lesiones, la plataforma podrá proponer acciones de conservación, previamente configuradas. Finalmente, se espera que la herramienta permita gestionar los procesos de conservación mediante la generación de incidencias u órdenes de trabajo, facilitando el registro de las acciones realizadas. Estas acciones podrán seguir las recomendaciones de los GD previamente establecidas o incorporar nuevos procedimientos según sea necesario.

Si bien el nivel de madurez de los Gemelos Digitales (GD) no necesariamente sigue una progresión lineal, se espera que la herramienta desarrollada sea lo suficientemente robusta para funcionar, en una primera etapa, como un repositorio centralizado de información HBIM (gráfica, no gráfica y vinculada) del caso de estudio. Es importante destacar que el proyecto de investigación cuenta con un modelo HBIM LOK300, elaborado a partir del proceso de documentación y análisis del edificio. Este modelo integra información estructural y arquitectónica del área de estudio, desarrollado mediante el modelado arquitectónico previo LOK200, la revisión de planos, bitácoras e informes de los procesos de construcción y restauración correspondientes a las décadas de 1890, 1940 y 1990, así como el reconocimiento de elementos estructurales mediante técnicas no invasivas, como el uso de cámaras endoscópicas, cámaras térmicas y ensayos de georadar (GPR).

Dentro de los principales retos a los que se enfrenta el equipo están los referentes para el desarrollo de la herramienta. A pesar de que la temática de los GD no es nueva, su aplicación en el ámbito del patrimonio cultural se encuentra en constante evolución, por tanto, las funcionalidades, la integración de los datos a recopilar, la interoperabilidad de diferentes tecnologías y la interacción del usuario con la herramienta constituyen una oportunidad para la exploración y la búsqueda constante de alternativas. Además, al tratarse de un inmueble representativo, en uso constante y con declaratoria de protección, los instrumentos y técnicas a aplicar deben ser respetuosos de los valores del edificio sin alterar su funcionamiento, esto limita las posibilidades en cuanto a la instalación de equipos y el establecimiento de acciones de conservación.

Agradecimientos

El equipo de investigación agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el apoyo para la realización del proyecto “Gemelo digital como herramienta de gestión del plan de conservación programada. Caso de estudio: foyer y fumadores del Teatro Nacional de Costa Rica”. Asimismo, se extiende el agradecimiento a las escuelas de Arquitectura y Urbanismo, Ingeniería en Diseño Industrial, Ingeniería en Computación e Ingeniería en Construcción, así como al Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla por el trabajo conjunto desarrollado durante los años de investigación. También se agradece al Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción, así como al Centro de Investigación y Extensión en Materiales, por el apoyo técnico. Finalmente, agradecemos al Teatro Nacional de Costa Rica y a las personas funcionarias del Departamento de Conservación, por ser parte del equipo que está haciendo posible el planteamiento y desarrollo de este proyecto.

Referencias

- [1] S. Della Torre, «La conservazione programmata: una strategia per il patrimonio storico-architettonico,» de *a conservazione programmata del patrimonio storico architettonico Linee guida per il piano di manutenzione e il consuntivo*, Milán, Edizioni Angelo Guerini e Associati SpA, 2003, pp. 15-20.
- [2] J. Bulgarelli-Bolaños, R. Malavassi-Aguilar, I. Hernández-Salazar, E. Salazar-Ceciliano y M. Valverde-Solano, «Herramientas de gestión y conservación programada en intervenciones de bienes inmuebles patrimoniales de Costa Rica,» Instituto Tecnológico de Costa Rica, San José, 2021.
- [3] E. Salazar-Ceciliano y R. E. Malavassi-Aguilar, «La conservación programada y su aplicación en la arquitectura: un análisis bibliométrico,» *Tecnología en Marcha*, pp. 79-88, Diciembre 2020.
- [4] E. Lucchi, «Digital twins for the automation of the heritage construction sector,» *Automation in Construction*, vol. 156, pp. 1-19, 2023.
- [5] J. Bulgarelli-Bolaños, I. Hernández-Salazar, R. Malavassi-Aguilar, E. Salazar-Ceciliano, M. Valverde-Solano y E. Solano-Fernández, «Gemelo digital en edificios patrimoniales y la evolución de este concepto en la producción científica,» *Tecnología en Marcha*, vol. 36, pp. 55-66, noviembre 2023.
- [6] D. Botín-Sanabria, A.-S. Mihaita, R. E. Peombert-García, M. A. Ramírez-Moreno, R. A. Ramírez-Mendoza y J. d. J. Lozoya-Santos, «Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review,» *Remote sensing*, vol. 14, n° 1335, pp. 1-25, 2022.
- [7] S. Evans, C. Savian, A. Burns y C. Cooper, Digital twins for the built environment: an introduction to the opportunities, benefits, challenges and risk, The Institution of Engineering and Technology, 2019.
- [8] L. Chen, X. Xie, Q. Lu, A. K. Parlakad, M. Pitt y J. Yang, «Gemini Principles-Based Digital Twin Maturity Model for Asset Management,» *Sustainability*, pp. 1-15, 2021.
- [9] Y. Wei, Z. Lei y S. Altaf, «An Off-Site Construction Digital Twin Assessment Framework Using Wood Panelized Construction as a Case Study,» *Buildings*, vol. 12, n° 566, pp. 1-18, 2022.
- [10] M. Castellano-Román y F. Pinto-Puerto, «Dimensions and Levels of Knowledge in Heritage Building Information Modelling, HBIM: The model of the Charterhouse of Jerez (Cádiz, Spain).,» *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 14, n° e00110, pp. 1-11, 2019.
- [11] M. Castellano-Román y F. Pinto-Puerto, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 14, n° e00110, pp. 1-11, 2019.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de IA ChatGPT. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista.