

**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE LA HABANA
FACULTAD DE GEOGRAFÍA**

**PROPUESTA DE UN MODELO HBIM-SIG PARA EL
DIAGNÓSTICO PATOLÓGICO DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor(a) en Ciencias
Geográficas

MSc. Liamnisbel Hernández Peña

**La Habana
2025**

**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE LA HABANA
FACULTAD DE GEOGRAFÍA**

**PROPUESTA DE UN MODELO HBIM-SIG PARA EL
DIAGNÓSTICO PATOLÓGICO DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor(a) en Ciencias
Geográficas

Autor(a): MSc. Liamnisbel Hernández Peña

Tutores: Dr.C. Alessandro Merlo

Dr.C. Ricardo Remond Noa

Dr.C. Sergio Ricardo Desdín

Dr.C. Sergio Raymant Arencibia Iglesias

**La Habana
2025**

AGRADECIMIENTOS

La culminación de esta tesis es el fruto de años de dedicación y esfuerzo, pero también del apoyo incondicional de quienes han sido fundamentales en este camino.

A mi madre, mi mayor tesoro, cuya presencia y amor han sido mi mayor fortaleza. A mi padre de crianza y mi padre biológico, así como a toda mi familia y esposo, quienes han estado a mi lado en cada paso, brindándome su respaldo y confianza.

Expreso mi más profundo agradecimiento a mis asesores y profesores, cuyas enseñanzas, paciencia y orientación han sido pilares esenciales en la consolidación de este trabajo. En especial, a los profesores del ITM, como el doctor Plinio; al profesor Anaya de Geocuba; y a los profesores de la Universidad de Florencia, especialmente mi tutor Alessandro, junto con Giulia, Gaia, Carlos Biangini, Andrea y Paradiso, a los arquitectos Stefania Franceschi Leonardo Germani. A los profesores de la facultad de Geografía y del colegio san Gerónimo. A todos aquellos que, de una manera u otra, contribuyeron a mi preparación, les extiendo mi reconocimiento.

A mis colegas y compañeros de investigación, por sus valiosos aportes, críticas constructivas y el intercambio de ideas que enriquecieron cada aspecto de este estudio. Su colaboración ha sido clave en la consecución de los objetivos planteados.

A mi empresa, y en particular a mi director Pedro, cuya guía ha sido para mí como la de un padre, siempre brindándome consejos y apoyo en cada momento. A Salas, a las agencias EMA y Fotogrametría, al equipo de informáticos y a todas las instituciones y personas que, directa o indirectamente, hicieron posible esta investigación.

Un agradecimiento especial a mis 4 tutores y al director, que aunque ya fueron mencionados han transitado conmigo por etapas muy difíciles para lograr que este gran reto se hiciera realidad.

A todos, gracias por ser parte de este logro.

SÍNTESIS

Esta investigación se enfoca en el desarrollo de un modelo innovador para la gestión y diagnóstico del Patrimonio Arquitectónico (PA), mediante la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Modelos de Información de Edificios Patrimoniales (HBIM), incorporando además el análisis de variables ambientales.

La investigación se enfoca en diseñar un sistema que facilite diagnósticos precisos del deterioro del PA, al vincular los modelos HBIM y los SIG para evaluar y modelar el impacto de factores ambientales, en la misma se establecen las bases teóricas y metodológicas para el uso combinado de SIG y HBIM, se elaboran representaciones cartográficas, modelos de variables ambientales y se emplea la evaluación multicriterio en el SIG.

Se enfatiza el enfoque interdisciplinario que conecta la Geomática, la Geografía y la Arquitectura, a través de tecnologías avanzadas para la documentación y análisis del PA.

El modelo integrado permite visualizar en un único sistema los elementos geográficos y arquitectónicos del PA, facilitando consultas personalizadas, la generación de mapas temáticos y diagnósticos patológicos automatizados. La optimización de la conservación y gestión del PA se refuerza mediante herramientas precisas y eficientes, proporcionando un análisis integral fundamentado en criterios geoespaciales y arquitectónicos.

La validación del modelo ha confirmado su eficacia y eficiencia en el diagnóstico del deterioro del PA, al combinar SIG y HBIM y mejorar sustancialmente las prácticas de conservación patrimonial. El presente trabajo aporta métodos novedosos y herramientas tecnológicas avanzadas para abordar los desafíos actuales en la preservación de edificaciones históricas.

SYNTHESIS

This research focuses on the development of an innovative model for the management and diagnosis of Architectural Heritage (AH) through the integration of Geographic Information Systems (GIS) and Heritage Building Information Modeling (HBIM), incorporating environmental variable analysis.

The study aims to design a system that facilitates precise diagnoses of AH deterioration by linking HBIM and GIS models to evaluate and model the impact of environmental factors. It establishes the theoretical and methodological foundations for the combined use of GIS and HBIM, develops cartographic representations, environmental variable models, and employs multicriteria evaluation within GIS.

The interdisciplinary approach emphasizes the connection between Geomatics, Geography, and Architecture through advanced technologies for the documentation and analysis of AH.

The integrated model allows for the visualization of geographic and architectural elements of AH within a single system, enabling customized queries, thematic map generation, and automated pathological diagnoses. The optimization of heritage conservation and management is reinforced through precise and efficient tools, providing a comprehensive analysis based on geospatial and architectural criteria.

The validation of the model has confirmed its effectiveness and efficiency in diagnosing AH deterioration by combining GIS and HBIM, significantly improving heritage conservation practices. This study contributes innovative methods and advanced technological tools to address current challenges in the preservation of historic buildings.

Tabla de contenidos

AGRADECIMIENTOS.....	3
SÍNTESIS	4
SYNTHESIS	5
Tabla de contenidos	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE TABLAS	12
RELACIÓN DE ANEXOS.....	13
LISTADO DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS.....	15
Introducción	1
Situación problemática.....	3
Problema Científico	5
Hipótesis.....	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos	6
Tareas	6
Aporte teórico	7
Aporte práctico.....	7
Novedad científica	8
Actualidad del tema	8
Estructura y contenido de la tesis	9
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICO METODOLÓGICOS	12
1.1 El Patrimonio Arquitectónico	12
1.2 El diagnóstico del Patrimonio Arquitectónico	13
1.3 Análisis del impacto de las variables ambientales y su integración en el modelo HBIM-SIG	16
1.4 Las tecnologías de la información geográfica en los estudios integrales del Patrimonio Arquitectónico.....	19
1.4.1 Áreas de aplicación de las TIG	19

1.4.2	Las TIG aplicadas al estudio del patrimonio arquitectónico y su deterioro	20
1.5	Los SIG en los estudios del PA.....	21
1.6	La metodología BIM y su empleo en el estudio del deterioro del PA.....	23
1.7	El HBIM aplicado al Patrimonio Arquitectónico	26
1.8	Modelación 3D de edificios históricos a partir de maquetas 3D <i>reality based</i>	27
1.9	Antecedentes y estado actual de la Integración de la metodología HBIM y los SIG	30
1.10	Conclusiones parciales capítulo 1	36
CAPÍTULO 2. PROPUESTA DE UN MODELO (HBIM-SIG) PARA EL DIAGNÓSTICO PATOLÓGICO DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO		39
2.1	Fuentes de información y herramientas	40
2.2	Exploración de la Instalación y análisis de las condiciones ambientales (A) .	44
2.3	Cartografía del deterioro en las paredes y muros (B).....	44
2.3.1	Representación cartográfica del inmueble (b1).....	45
2.3.2	Deterioro esperado en el inmueble (b2).....	54
2.3.3	Modelo matemático para la representación de las condiciones favorables de deterioro en paredes y muros	56
2.4	Modelo de información de la edificación y SIG con información del deterioro en cada pared y muro (C).....	61
2.4.1	Diagnóstico del PA	65
2.5	Inventario de signos de deterioro de la infraestructura por métodos tradicionales (D)	68
2.6	Validación del modelo propuesto (E)	68
2.7	Conclusiones parciales capítulo 2.....	69
CAPÍTULO 3. VALIDACIÓN DEL MODELO (HBIM-SIG), EN EL DIAGNÓSTICO PATOLÓGICO DE LA UNIVERSIDAD DE LAS ARTES.		72
3.1	Caso de estudio.....	72
3.2	Descripción general y estado actual	73
3.3	Análisis de las condiciones ambientales en el momento del diagnóstico (A)	75
3.4	Cartografía del deterioro en las paredes y muros (B).....	81

3.4.1	Representación cartográfica del inmueble (b1)	81
3.4.2	Deterioro esperado en el inmueble (b2).....	84
3.5	Representación cartográfica del deterioro potencial del inmueble	86
3.5.1	Alteración Cromática	86
3.5.2	Depósito Superficial.....	88
3.5.3	Pérdida de Material.....	90
3.5.4	Desprendimiento	92
3.5.5	Colonización Biológica.....	94
3.6	Modelo HBIM-SIG y diagnóstico del PA (C).....	96
3.7	Inventario de signos de deterioro de la infraestructura por métodos tradicionales (D)	101
3.8	Validación del modelo propuesto (E)	102
3.8.1	Limitaciones del modelo propuesto y de los resultados del estudio	104
3.9	Conclusiones parciales capítulo 3.....	106
CONCLUSIONES FINALES		108
RECOMENDACIONES.....		110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		111
BIBLIOGRAFÍA.....		125
ANEXO		132

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Ejemplos de deterioros identificados en las fotografías de paredes y muros / **15.**
- Figura 2.** Áreas de aplicación de las TIG / **20.**
- Figura 3.** Esquema general del modelo propuesto / **43.**
- Figura 4.** Esquema del levantamiento digital / **46.**
- Figura 5.** Tecnologías empleadas en el levantamiento digital / **48.**
- Figura 6.** Esquema de procesamiento de la información / **49.**
- Figura 7.** Vista de Dianas empleadas durante el levantamiento con Escáner Láser Terrestre. / **51.**
- Figura 8.** Vista de *Tarjets* empleados durante el levantamiento con cámaras fotográficas / **52.**
- Figura 9.** Creación de muros / **53.**
- Figura 10.** Creación de pilares arquitectónicos y estructurales / **53.**
- Figura 11.** Adición de suelos y cubiertas / **53.**
- Figura 12.** Creación de escaleras y barandillas / **54.**
- Figura 13.** Adición de puertas y ventanas / **54.**
- Figura 14.** Transformaciones monótonas de la escala ordinal para encontrar una expresión numérica de la importancia de los impactos / **58.**
- Figura 15.** Transformaciones monótonas decreciente de la escala ordinal para encontrar una expresión numérica de la importancia de los impactos / **58.**
- Figura 16.** Algoritmo para realizar el vínculo de los elementos HBIM- SIG / **62.**
- Figura 17.** Relaciones de dependencias HBIM-SIG / **64.**
- Figura 18.** Humedad relativa promedio por meses del año y horas del día / **76.**
- Figura 19.** Temperaturas máximas y mínimas promedio por meses del año y horas del día / **77.**
- Figura 20.** Precipitaciones por meses de la temporada / **77.**
- Figura 21.** Dirección predominante de los vientos, estación de Casa Blanca en La Habana / **78.**
- Figura 22.** Promedio de horas de sol diarias al mes / **79.**
- Figura 23.** Representación de las paredes y muros del inmueble / **81.**

- Figura 24.** Modelos tridimensionales / **83.**
- Figura 25.** Histograma de distribución de alturas promedios de los muros y paredes de la instalación / **83.**
- Figura 26.** Imágenes fotográficas que representan el estado de deterioro de la instalación / **84.**
- Figura 27.** Mapa de Alteración Cromática en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 y nivel 2 respectivamente / **87.**
- Figura 28.** Histogramas de resumen estadístico de la presencia de alteración cromática en paredes y muros por niveles y ubicación / **87.**
- Figura 29.** Mapa de Depósito Superficial en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 y 2 respectivamente / **89.**
- Figura 30.** Histogramas de resumen estadístico de la presencia de depósito superficial en paredes y muros por niveles y ubicación / **90.**
- Figura 31.** Mapa de Pérdida de Material en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 y nivel 2 respectivamente / **91.**
- Figura 32.** Histogramas de resumen estadístico de la presencia de Pérdida de Material en paredes y muros por niveles y ubicación / **92.**
- Figura 33.** Mapa de Desprendimientos en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 y nivel 2 respectivamente / **93.**
- Figura 34.** Histogramas de resumen estadístico de la presencia de Desprendimientos en paredes y muros por niveles y ubicación / **94.**
- Figura 35.** Mapa de Pátina Biológica en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 y nivel 2 / **95.**
- Figura 36.** Histogramas de resumen estadístico de la presencia de Ataque Biológico en paredes y muros por niveles y ubicación / **96.**
- Figura 37.** Obtención del modelo HBIM-SIG / **97.**
- Figura 38.** Representación del deterioro en paredes y muros, modelo HBIM-SIG / **98.**
- Figura 39.** Mapas de gravedad en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 y nivel 2 respectivamente a partir del análisis multicriterio / **99.**

Figura 40. Mapas de prioridad en la intervención en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 a partir del análisis multicriterio / **100.**

Figura 41. Histogramas que representan gravedad de los deterioros en paredes y muros en nivel 1 y nivel 2 / **100.**

Figura 42. Histogramas que representan prioridad en la intervención en paredes y muros en nivel 1 y nivel 2 / **101.**

.

.

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1.** Influencia de las variables según la posición y nivel / **55.**
- Tabla 2.** Valoración cualitativa simple de los expertos de la influencia de los factores ambientales sobre los deterioros / **57.**
- Tabla 3.** Sentido de la relación entre los factores ambientales y las condiciones para la aparición de los deterioros según los expertos / **57.**
- Tabla 4.** Descripción de la matriz de relación causa- efecto / **59.**
- Tabla 5.** Matriz de incidencia de las mediciones de los factores ambientales /**60.**
- Tabla 6.** Estadísticas de la cartografía de la instalación / **82.**
- Tabla 7.** Paredes y muros con mejores condiciones para la aparición de la alteración cromática / **88.**
- Tabla 8.** Paredes y muros con mejores condiciones para encontrar depósitos superficiales / **90.**
- Tabla 9.** Paredes y muros con condiciones más favorables para la pérdida de material / **92.**
- Tabla 10.** Paredes y muros con condiciones más favorables para el desprendimiento / **94.**
- Tabla 11.** Paredes y muros con condiciones más favorables para el ataque biológico / **96.**

RELACIÓN DE ANEXOS

- ANEXO 1:** Esquema general simplificado / **130.**
- ANEXO 2:** Modelación del comportamiento de la radiación solar en el área de estudio en el solsticio de verano y solsticio de invierno / **131.**
- ANEXO 3:** Listado de expertos / **132.**
- ANEXO 4:** Matriz en Excel resultado del Modelo Matemático/ **133 y 134.**
- ANEXO 5:** Listado de expertos / **135.**
- ANEXO 6:** Inventario por métodos tradicionales / **136.**
- ANEXO 7:** Modelo digital de superficie. Fuente: Elaborada por la autora / **137.**
- ANEXO 8:** Mapas de interpolación espacial de la humedad relativa y su relación con los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 / **138.**
- ANEXO 9:** Mapas de interpolación espacial de la humedad relativa y su relación con los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 2 / **139.**
- ANEXO 10:** Mapas de interpolación espacial de la temperatura atmosférica y su relación con los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 / **140.**
- ANEXO 11:** Mapas de interpolación espacial de la temperatura atmosférica y su relación con los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 2 / **141.**
- ANEXO 12:** Mapa de representación de la exposición de las paredes y muros interiores y exteriores a la dirección predominante del viento para el nivel 1 / **142.**
- ANEXO 13:** Mapa de representación de la exposición de las paredes y muros interiores y exteriores a la dirección predominante del viento para el nivel 2 / **143.**
- ANEXO 14:** Mapa de representación de la exposición de las paredes y muros interiores y exteriores a la radiación solar / **144.**

- ANEXO 15:** Mapa de representación de la cercanía de las paredes y muros interiores y exteriores al manto freático / **145.**
- ANEXO 16:** Informe patológico detallado / **146.**
- ANEXO 17:** Informe patológico general / **147.**
- ANEXO 18:** Análisis estadístico de gravedad del deterioro y prioridad en la intervención / **148.**
- ANEXO 19:** Resumen de los resultados del Índice de Kappa (paredes y muros exteriores) / **149.**
- ANEXO 20:** Resumen de los resultados del Índice de Kappa (paredes y muros interiores) / **150.**

LISTADO DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS

- **Ac:** Alteración Cromática
- **ASADES:** Asociación Argentina de Energía Solar
- **CAD:** Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora)
- **DB:** DataBase (Base de Datos)
- **EMC:** Evaluación Multicriterio
- **ELT:** Escáner Láser Terrestre
- **FAT:** Facultad de Arte Teatral
- **GIS:** Geographical Information Systems (Sistemas de Información Geográfica)
- **HBIM:** Heritage Building Information Modeling (Modelado de Información de Edificios Patrimoniales)
- **INSMET:** Instituto de Meteorología de Cuba
- **ISA:** Universidad de las Artes (Instituto Superior de Arte)
- **IoT:** Internet of Things (Internet de las Cosas)
- **LOD:** Level of Development (Nivel de Desarrollo en BIM)
- **MDS:** Modelo Digital de Superficie
- **MDE:** Modelo Digital de Elevaciones
- **PA:** Patrimonio Arquitectónico
- **SIG:** Sistemas de Información Geográfica
- **SIGEDPA:** Sistema para la Gestión y Diagnóstico del Patrimonio Arquitectónico
- **UAV:** Unmanned Aerial Vehicle (Vehículo Aéreo No Tripulado)
- **XR:** Extended Realities (Realidades Extendidas)

Referencias y Documentación

- **3D CAD:** Computer-Aided Design en tres dimensiones
- **NC:** Norma Cubana
- **ONM:** Oficina Nacional de Meteorología

- **UNESCO:** Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

Herramientas y Software

- **Agisoft Metashape:** Software de procesamiento fotogramétrico
- **ArcGIS:** Plataforma para análisis espacial y SIG
- **Cyclone:** Software para procesar datos de ELT
- **DJI:** Marca de drones
- **QGIS:** Software libre para Sistemas de Información Geográfica
- **TruView:** Visualización interactiva de nubes de puntos

Procesos y Diagnósticos

- **Cf:** Condiciones Favorables
- **Ds:** Depósito Superficial
- **Pm:** Pérdida de Material
- **Dp:** Desprendimientos
- **Ac:** Alteración Cromática
- **Ab:** Ataque Biológico

Introducción

La incorporación de tecnologías innovadoras en los estudios urbanos y la conservación del Patrimonio Arquitectónico (PA), tanto en zonas urbanas de relevancia como en áreas rurales, representa un desafío significativo. Este reto no solo contribuye a la preservación de nuestro legado cultural, sino que también ofrece ventajas cualitativas y cuantitativas, impactando positivamente en la economía y la sociedad. A través del uso de herramientas avanzadas y metodologías modernas, es posible optimizar los procesos de documentación, análisis y gestión del PA, brindando soluciones eficientes y sostenibles que aseguran la integridad y el valor histórico de los espacios para futuras generaciones.

Las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG), especialmente los Sistemas de Información Geográficas (SIG) y la Teledetección, tienen una amplia aplicación en diversas áreas de la sociedad. La combinación con los avances en la recolección de información espacial ha transformado los levantamientos morfométricos, optimizando la ejecución de trabajos de campo y reduciendo tiempos y costos en los procesos de documentación y análisis. Estas herramientas permiten generar nubes de puntos densas y mallas 3D, cuyos procesos de representación, procesamiento y modelación facilitan la creación de nuevos productos en disciplinas como geografía, arquitectura, arqueología y construcción, entre otras.

El acrónimo BIM (Modelado de la Información de la Edificación) permite crear un sistema de información digital de un edificio o sitio, asociado a su documentación gráfica, siendo esta generalmente un modelo tridimensional del mismo. Por lo tanto, es considerado como el conjunto de metodologías, procesos, herramientas y formatos digitales para la gestión de proyectos y obras de construcción. Es la integración digital de las características geométricas, físicas y funcionales de un edificio o conjuntos de ellos, total o parcialmente, que permite crear, mantener y modificar la información de un modelo digital a lo largo de su ciclo de vida (Choclán Gámez et al., 2015).

El empleo del HBIM (Modelado de la información de edificaciones patrimoniales), representa un modo de trabajo que permite conectar modelos tridimensionales, construidos, a partir de una documentación digital, con una

base de datos. Dichos modelos, cuya geometría es caracterizada por parámetros conocidos, pueden ser modificados sobre las informaciones contenidas en la base de datos, resultando extremadamente útiles para la realización de análisis comparativos e hipótesis reestructurativas y materialización de proyectos de conservación del PA.

El desarrollo tecnológico permite la preservación de los valores patrimoniales y del medio ambiente, teniendo en cuenta que los estudios que se realicen empleando tecnologías innovadoras en función del desarrollo deben contribuir al equilibrio ambiental y al bienestar de los habitantes.

El PA constituye en la actualidad una premisa fundamental para el desarrollo socioeconómico y la reafirmación de la identidad cultural de las ciudades, este revela su historia y transmite de generación en generación con muestras palpables los estilos de vida de nuestros antepasados, por lo que es de vital importancia su conocimiento y conservación. Como fue expresado en (Asamblea General de los Estados Partes en la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, 2005) ... “el problema de las intervenciones arquitectónicas contemporáneas en bienes del patrimonio mundial y en sus inmediaciones preocupa cada vez más a los planificadores, los urbanistas, los promotores, los arquitectos, los profesionales de la conservación, los propietarios de bienes, los inversores y los ciudadanos interesados” (UNESCO, 2005).

Es importante también para el desarrollo del turismo, pues su conservación y puesta en valor propicia a los visitantes el conocimiento de su historia, sus características, lo que mejora la economía local, la calidad de vida y la transmisión de la cultura e identidad nacional. Algunos equipos de trabajo han creado plataformas de información digital que recogen datos sobre el PA, (Martínez Villa, 2018; Rigol & Rojas, 2012; Blanco Diazgranados, 2018; Avilés Garragaté et al., 2020) por solo mencionar algunos ejemplos; sin embargo, los modelos y tecnologías empleadas para el diagnóstico del deterioro del PA no tienen en cuenta la influencia que ejercen sobre los inmuebles las variables ambientales y carecen del empleo de las herramientas de análisis espacial y modelación en los SIG para realizar el diagnóstico.

La protección del patrimonio arquitectónico se encuentra respaldada por un conjunto de normativas y directrices que garantizan su conservación y uso sostenible. Entre ellas, la Ley 155/2022, conocida como la *Ley General de Protección al Patrimonio Cultural y al Patrimonio Natural*, establece un marco legal para la preservación del patrimonio en Cuba, definiendo categorías de protección que abarcan desde monumentos nacionales hasta el patrimonio cultural inmaterial. Esta ley reconoce el valor histórico y ambiental de los bienes patrimoniales e incorpora principios de gestión que buscan la integración de tecnologías innovadoras, como HBIM y SIG, para el diagnóstico y monitoreo de estructuras históricas. La incorporación de estas herramientas digitales permite no solo documentar con precisión el estado del patrimonio, sino también fortalecer estrategias de conservación alineadas con estándares internacionales, consolidando un modelo de gestión patrimonial basado en datos geoespaciales y criterios científicos.

La investigación aborda las limitaciones de la integración de SIG y HBIM mediante el desarrollo de un modelo flexible que combina escalas urbanas y arquitectónicas a través de un ciclo iterativo. El enfoque ajusta datos climáticos generales a las condiciones específicas de las edificaciones, logrando diagnósticos detallados y ampliando la aplicabilidad del modelo a contextos urbanos más amplios. La metodología incorpora herramientas avanzadas adaptadas al análisis patrimonial, empleando software libre y procesos accesibles para garantizar su compatibilidad con escenarios locales.

El método propuesto se distingue por su enfoque adaptable, que permite personalizar bases de datos y variables ambientales según las características de cada edificio y su entorno urbano. La implementación de procesos de actualización continua asegura la relevancia del modelo frente a cambios dinámicos en las condiciones ambientales, consolidando su utilidad en proyectos de conservación patrimonial. Además, la aplicación de tecnologías interoperables promueve la replicabilidad de la metodología en diferentes regiones, ampliando su impacto más allá del caso de estudio.

Situación problemática

La gestión del PA enfrenta desafíos críticos debido a modelos de diagnóstico que omiten variables ambientales clave (humedad, salinidad, radiación UV,

etc.) y carecen de integración efectiva entre tecnologías como HBIM y SIG. Esta fragmentación metodológica genera análisis incompletos, incapaces de correlacionar deterioros específicos con factores geográficos o climáticos, particularmente en contextos vulnerables como Cuba, donde el 55.6% de las edificaciones evaluadas en Santa Fe (2015) registraron aceleración de daños estructurales tras ocho años sin mantenimiento preventivo (Domínguez & González, 2015). Ejemplos como el colapso parcial del Instituto Superior de Diseño (ISDI) en La Habana (2025) evidencian la ausencia de sistemas predictivos que combinen modelado 3D (HBIM) con datos geoespaciales (SIG), limitándose a diagnósticos reactivos basados en inspecciones visuales (Hernández Peña et al., 2024).

En el ámbito internacional, proyectos como la metodología UNDP (2023) para riesgos biológicos y ambientales demuestran avances en identificación de patrones, pero persisten vacíos en la vinculación de microclimas con modelos estructurales, como se observó en estudios de erosión de piedra caliza en Ecuador-Cuba (2020) (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2023; ScienceAQ, 2020). La experiencia del proyecto Digital Twin en Bélgica (2019) revela que la integración HBIM-IOT permite monitorear microfisuras y humedad en tiempo real, solución aún no implementada en Cuba pese a su urgencia ante fenómenos como la elevación del nivel del mar (Jouan & Hallot, 2019).

Las limitaciones técnicas actuales incluyen: 1) incompatibilidad de escalas entre HBIM (detalle milimétrico) y SIG (análisis territorial), ejemplificada en la desconexión entre modelos del ISDI y datos de hundimientos en Centro Habana; 2) enfoques estáticos, como la "Tabla de Puntuación Ponderada" cubana, que no incorpora variables dinámicas; y 3) aislamiento disciplinar, donde métodos como el de Tejera-Álvarez (2012) para patologías constructivas ignoran capas SIG de vulnerabilidad ambiental (Cantos García, 2024). Estas carencias se agravan en entornos con normativas preservacionistas ambiguas, como en Mar del Plata (Argentina), donde intervenciones contemporáneas en barrios históricos (2022) evidencian dificultades para armonizar nueva arquitectura con legados existentes (Lucero, 2022), problema replicado en el Centro Histórico de la Ciudad de México por la falta de protocolos unificados

entre INAH y autoridades locales (Autoridad del Centro Histórico de la Ciudad de México, 2022).

La ausencia de modelos híbridos HBIM-GIS no solo obstaculiza la conservación preventiva, sino que perpetúa prácticas reactivas, como las documentadas en Santa Fe (La Habana), donde edificaciones catalogadas como "Muy Buenas" en 2006 mostraron daños graves en 2014 (Domínguez & González, 2015). Urge desarrollar sistemas que integren sensores ambientales, algoritmos predictivos y análisis espacial avanzado, siguiendo casos exitosos como Valencia (España, 2021), donde la correlación entre turismo y degradación de fachadas mediante SIG-HBIM ha optimizado planes de mantenimiento (Viñals Blasco, 2021). Esta investigación propone superar estas limitaciones mediante un marco interdisciplinario que unifique escalas, tecnologías y variables ambientales para diagnósticos integrales del patrimonio arquitectónico en crisis climática.

Problema Científico

¿Cómo vincular los Sistemas de Información Geográfica con los modelos HBIM que facilite la gestión y el diagnóstico del patrimonio arquitectónico asociando la presencia de variables ambientales?

A partir de lo anterior, se define el deterioro de los inmuebles patrimoniales como objeto de estudio y su diagnóstico mediante un modelo integrador de tecnologías (HBIM-SIG) como campo de acción, con el propósito de superar las limitaciones metodológicas actuales y optimizar la gestión del patrimonio arquitectónico en contextos ambientales complejos.

Hipótesis

El diagnóstico del deterioro en edificaciones patrimoniales puede realizarse mediante un modelo que integre HBIM y SIG, incorporando el análisis de variables ambientales que inciden en su degradación, con el fin de optimizar el diagnóstico patológico del PA.

Objetivo general

Desarrollar un modelo que vincule los SIG con los HBIM para el diagnóstico del deterioro del PA teniendo en cuenta la influencia de las variables ambientales.

Objetivos específicos

1. Fundamentar los enfoques teórico-metodológicos y las tecnologías empleadas para el estudio del deterioro del PA de inmuebles patrimoniales.
2. Proponer un modelo para el estudio del deterioro del PA con valores patrimoniales que vincule los SIG con los HBIM para el análisis y modelación de las variables ambientales que influyen sobre este.
3. Validar los resultados de la aplicación del modelo propuesto para el estudio del deterioro del PA.

Tareas

- Búsqueda y análisis de la literatura, artículos, materiales relacionados con el tema para constatar el estado en que se encuentra el objeto de estudio.
- Revisión bibliográfica y analítica relacionada con la teoría, los conceptos y los procedimientos metodológicos, como apoyo a la operacionalización de la investigación.
- Elaboración del diseño teórico metodológico de la investigación.
- Preparación de la base cartográfica.
- Generación de la representación cartográfica de los inmuebles patrimoniales y modelación en el SIG de las variables ambientales del área objeto de estudio.
- Integración del estudio de las variables ambientales en el diagnóstico del deterioro del patrimonio arquitectónico, aplicando herramientas SIG para su análisis y modelación en combinación con HBIM.
- Programación de una aplicación informática para la vinculación de los resultados obtenidos en una misma plataforma.
- Comparación entre los resultados obtenidos mediante el modelo y el inventario realizado por métodos tradicionales.
- Elaboración de tablas, gráficos y mapas, representativos de los análisis.

- Elaboración del informe final de la investigación.

Aporte teórico

El presente estudio contribuye teóricamente al campo del PA, particularmente en el diagnóstico de su estado, mediante la propuesta y validación de un modelo que integra dos tecnologías claves y facilita un diagnóstico más eficiente del deterioro de las edificaciones. Aunque la literatura existente ha explorado, por un lado, el deterioro de las edificaciones a través de la metodología HBIM y, por otro, la influencia de las variables ambientales sobre los inmuebles, pocos estudios han abordado la integración de HBIM y SIG. Además, la mayoría de los trabajos emplean programas informáticos de compañías privadas que limitan su accesibilidad.

Esta investigación confirma la hipótesis de que el diagnóstico del deterioro de las edificaciones es viable mediante un modelo que vincule los HBIM con las herramientas de análisis y modelación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Dicho modelo incorpora el análisis de variables ambientales que favorecen el deterioro, con el objetivo de optimizar el diagnóstico. Se espera que los resultados obtenidos en esta investigación amplíen el acceso y el uso de estas tecnologías en Cuba, dado que gran parte del modelo propuesto se fundamenta en software libre y en aplicaciones específicamente desarrolladas para alcanzar los objetivos planteados.

Aporte práctico

El modelo propuesto optimiza la gestión de edificaciones patrimoniales al identificar con precisión las infraestructuras con mayor probabilidad de deterioro. La integración de la metodología HBIM y los SIG en una plataforma única facilita la toma de decisiones de intervenciones en función de la gravedad y manifestación de los daños detectados en cada inmueble, proporcionando un enfoque más eficiente para la conservación y restauración.

La visualización conjunta de datos provenientes de SIG y HBIM, complementada con información topográfica, tecnologías geomáticas y mediciones de variables ambientales, ofrece una documentación más integral del PA. Esta sinergia no solo facilita un análisis más exhaustivo, sino que también permite agilizar los procesos de diagnóstico, aumentando la capacidad

para abordar un mayor número de estudios y levantamientos de inmuebles con valores patrimoniales.

Además, uno de los principales aportes de esta investigación es la creación de un modelo que pone al alcance de las instituciones cubanas la integración de ambas tecnologías, empleando en su mayoría software libre. El enfoque promueve la democratización tecnológica, fomentando la accesibilidad y sostenibilidad de las soluciones aplicadas al diagnóstico y conservación del PA. Asimismo, fortalece las capacidades locales y contribuye a desarrollar una metodología más eficiente y ajustada a las necesidades específicas del país.

Novedad científica

Se presenta y valida un modelo innovador que integra los SIG y HBIM con el propósito de representar y diagnosticar el deterioro del PA. El modelo permite automatizar el proceso de diagnóstico y contempla la influencia de variables ambientales, modeladas dentro de los SIG.

La validación del modelo, realizada mediante el índice de Kappa Statologos. (2025), confirma la fiabilidad de los resultados obtenidos, destacando la efectividad de la integración HBIM-SIG en el diagnóstico de edificaciones patrimoniales con resultados satisfactorios. Esta integración facilita la combinación de datos derivados de levantamientos HBIM, fotografías y la modelación de variables ambientales, permitiendo priorizar las intervenciones de restauración según la gravedad de los deterioros identificados.

En síntesis, la tesis aborda un problema multidimensional donde variables como la humedad, temperatura, viento, radiación solar, cercanía al manto freático y factores biológicos inciden de manera significativa en el deterioro de las edificaciones. La incorporación de estas variables en un modelo HBIM-SIG optimiza el diagnóstico y mejora la gestión de la conservación del PA. El enfoque representa un avance significativo al facilitar estudios más eficientes y accesibles mediante herramientas tecnológicas integradas, diseñadas para instituciones cubanas, empleando software libre y técnicas específicas adaptadas al contexto local.

Actualidad del tema

Ante los retos que implica la conservación del PA es imprescindible el empleo de tecnologías y modelos que vinculen las herramientas de las TIG, faciliten,

mejoren la precisión y disminuyan los costos del diagnóstico de los niveles de deterioro que sufren estas edificaciones.

En esta investigación se emplearon métodos científicos entre los que se destacan los teóricos que incluyen el histórico lógico, hipotético deductivo, entre otros y como métodos empíricos, la observación, la medición y el experimento. Las herramientas de análisis espacial y estadístico en el SIG fueron utilizadas para la representación y modelación de las variables ambientales y la obtención de los valores a incluir en la modelación matemática para determinar las probabilidades de aparición de los deterioros en las paredes de la edificación a partir de la influencia de estas. Se empleó además el método de consulta a expertos y las consultas bibliográficas, para determinar a partir de los dos métodos, la incidencia que tiene las variables ambientales en la aparición de deterioros según el tipo de material, además, para desarrollar los análisis multicriterio (EMC), que permitieron generar un modelo sintetizado que representa las paredes y muros con prioridad en la intervención según la gravedad y manifestación de los deterioros.

Para la comprobación se emplean métodos estadísticos que permiten contrastar el modelo propuesto a partir de su análisis con los resultados obtenidos mediante los métodos tradicionales.

Estructura y contenido de la tesis

La tesis está estructurada en: síntesis, introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas, bibliografía y anexos; cuenta con 104 páginas, 11 tablas, 42 figuras y 20 anexos (con tablas y mapas). Los contenidos de los capítulos se resumen a continuación:

La tesis se divide en tres capítulos.

El capítulo 1 de la tesis aborda diversos aspectos relacionados con el PA y su diagnóstico, utilizando las TIG. Se explica qué son las TIG, sus ventajas y áreas de aplicación, y se detalla su uso en el estudio del deterioro del PA. Además, se exploran los SIG y la tecnología BIM, así como el HBIM y su aplicación en la modelación 3D de edificios históricos. Se discuten los antecedentes y el estado actual de la integración HBIM-SIG.

El Capítulo 2 de la tesis propone un modelo (HBIM-SIG) para el diagnóstico patológico del PA, estructurado en cinco etapas fundamentales. Las etapas

incluyen la exploración de la instalación y el análisis de las condiciones ambientales (A), la cartografía del deterioro en las paredes y muros (B), donde se realizan la representación cartográfica del inmueble (B1) y el análisis y modelación en el SIG del deterioro esperado (B2) en el que se analiza el impacto de las variables ambientales en el deterioro del PA mediante herramientas SIG y HBIM. La tercera etapa (C) involucra un modelo matemático para representar las condiciones favorables de deterioro, con el cálculo específico para la manifestación de tipos de deterioro, integrando el HBIM y SIG con información detallada del deterioro en cada pared y muro, concluyendo con un diagnóstico del PA. Las últimas etapas incluyen el inventario de signos de deterioro mediante métodos tradicionales (D) y la validación del modelo propuesto (E), (mediante el cálculo del índice de kappa). En el capítulo 3 se aplica el modelo propuesto, tomando como caso de estudio la Facultad de Arte Teatral de la Universidad de las Artes (ISA), se lleva a cabo la contrastación del modelo diseñado, lo que permite comprobar los resultados alcanzados en la investigación y analizar las limitaciones del modelo. Se extraen conclusiones a partir de los resultados obtenidos, recomendaciones que abren brechas a posibles investigaciones futuras y los anexos.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICO METODOLÓGICOS

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICO METODOLÓGICOS

El presente capítulo tiene como objetivos considerar los conceptos básicos que se utilizan en el PA y analizar los antecedentes, impactos y perspectivas de la aplicación de las tecnologías de avanzada para su conservación.

1.1 El Patrimonio Arquitectónico

El PA se refiere al conjunto de edificaciones, estructuras y espacios urbanos que poseen un valor cultural histórico, estético o social significativo para la sociedad. Estas construcciones suelen ser representativas de una época, estilo arquitectónico o tradición cultural específica y se consideran parte importante del legado que se transmite de generación en generación. El mismo puede incluir edificios históricos, monumentos, sitios arqueológicos, parques y jardines, entre otros elementos construidos que forman parte de la identidad y la memoria colectiva en una comunidad. Este puede definirse como el conjunto de bienes edificados, de cualquier naturaleza, a los que cada sociedad atribuye o en los que cada sociedad reconoce un valor cultural (Azkarate et al., 2003).

El Patrimonio Histórico (PH) o Patrimonio Cultural (PC), acepciones consideradas sinónimos (Carreton, 2018), es la herencia recibida de los antepasados, formada por los bienes culturales que la historia ha transmitido a los cuales la sociedad da importancia cultural, científica, simbólica o estética (López Sorzano et al., 2005). Es el producto de la creatividad humana, la herencia cultural propia del pasado, mantenida hasta la actualidad y transmitida a las generaciones presentes (UNESCO, 1974). La transmisión de individuo a individuo y de generación a generación va acompañada de su constante modificación. Estas transformaciones dejan sus huellas, generando una naturaleza evolutiva perceptible (García et al., 2018).

El mismo se divide en dos categorías, tangible e intangible. El patrimonio intangible, engloba los modos de vida, los derechos fundamentales del ser humano, los sistemas de valores, las tradiciones y las creencias (Brusaporci, 2017). Su conservación permite a las futuras generaciones un mejor conocimiento y valoración de la historia de los pueblos (Yibo, 2009).

El tangible es la expresión de las culturas a través de realizaciones materiales, las cuales pueden ser bienes muebles como objetos arqueológicos, históricos, artísticos o científicos y bienes inmuebles, como sitios, monumentos o

edificaciones con valor relevante desde el punto de vista arquitectónico que no pueden ser trasladadas de un lugar a otro.

Cuando se afronta cualquier proyecto de restauración es importante disponer desde el inicio de una documentación del PA, que sea exhaustiva, de precisión y lo más actualizada posible (Mesanza Moraza, 2011).

1.2 El diagnóstico del Patrimonio Arquitectónico

La transformación veloz muchas veces provoca la baja conciencia de la importancia cultural y espiritual de conservar con muestras palpables la herencia del modo de vida y las relaciones sociales de nuestros antepasados.

El diagnóstico es el análisis y síntesis de la información para evaluar los problemas en los bienes y la condición actual de la edificación o sus elementos y su evolución en el tiempo (Idrovo et al., 2012). El diagnóstico surge de la necesidad de detectar los deterioros existentes para dar solución a problemas constructivos en las edificaciones; proviene de la palabra griega "diagnósticos" (reconocer, tener conocimiento de la enfermedad); por lo tanto, el diagnóstico, es evaluar si hay o no deterioros, la causa que los originan y la incidencia de esta en el edificio (Delgado Espinosa, 2014).

De acuerdo con la profundidad y exactitud, el diagnóstico puede ser visual o directo (se vale de la percepción directa del investigador), intensivo (en él se emplean todos los ensayos e instrumentos para la recepción de información que permite profundizar en los deterioros) y combinado (combina la tecnología de reconocimiento con los métodos visuales o sensoriales) (Delgado Espinosa, 2014).

Existen tres tipos de diagnóstico: diagnóstico sobre la anormalidad (es el que decide si hay o no patología en el edificio), diagnóstico clasificatorio (afirma que existe patología y reconoce la causa que la origina) y diagnóstico individualizado (trata sobre la comprensión del problema patológico concretándolo al caso estudiado y a su entorno específico) (Herrera Fuentes, 2019).

Uno de los primeros trabajos a los que se tiene que enfrentar todo técnico antes de proyectar la rehabilitación de un edificio es el de averiguar el estado real en el que se encuentra el mismo, de manera que se puedan resolver los problemas que presente ya sean estructurales como funcionales. Muchas veces se realizan diagnósticos generales que sirven para todo tipo de edificios

y no se profundiza en las particularidades de la edificación (Mesanza Moraza, 2011).

En otras ocasiones se hacen catas y ensayos para los que es necesario romper algunas partes del edificio con el objetivo de valorar su estado, llevar muestras a los laboratorios para su estudio o comprobar la composición de determinados elementos constructivos. Existen muchas circunstancias en las que el diagnóstico con esas técnicas no es viable por encontrarse el edificio habitado, por ser inaccesible, etc.

El deterioro se define como el proceso gradual de pérdida de prestaciones en un inmueble debido a agentes físicos, químicos o mecánicos (como humedad, radiación UV o cargas estructurales). Es un fenómeno objetivo y medible que abarca desde fisuras superficiales hasta colapsos parciales, y puede ser reversible o irreversible según su etapa. Ejemplos incluyen la carbonatación del hormigón o la erosión en fachadas por contaminación ambiental (Broto, 2006; Escudero, 2021).

La patología, en cambio, es el estudio sistemático de las causas, mecanismos y consecuencias del deterioro, enfocado en diagnosticar su origen y evolución. Mientras el deterioro describe el daño observable (grietas, eflorescencias), la patología analiza las relaciones causa-efecto, como la correlación entre humedad por capilaridad y la aparición de moho en muros históricos (Broto, 2006; López-González & García-Valldecabres, 2023).

El deterioro en la construcción se refiere al proceso por el cual un edificio va perdiendo su funcionalidad y se acerca a un estado en el que ya no es adecuado para su uso. Dicho fenómeno puede ser causado por diversos factores, como la descomposición natural del material de construcción. Es importante estar atento a los signos de deterioro en un edificio para poder tomar medidas preventivas y de mantenimiento a tiempo, evitando así problemas mayores en el futuro (Broto, 2006).

En esta investigación el diagnóstico del deterioro del inmueble se determina a partir de la representación y análisis de la influencia de las variables ambientales seleccionadas, atendiendo a los tipos de deterioros identificados en la exploración del inmueble, descartando los deterioros que no están presentes y las variables ambientales que no aporten información.

A partir de los recorridos realizados con un grupo de expertos, en el caso de estudio Facultad de Arte Teatral (FAT) se identificaron en cinco grupos los deterioros presentes según la clasificación (ICOMOS, 2003) utilizada como referencia (figura 1).

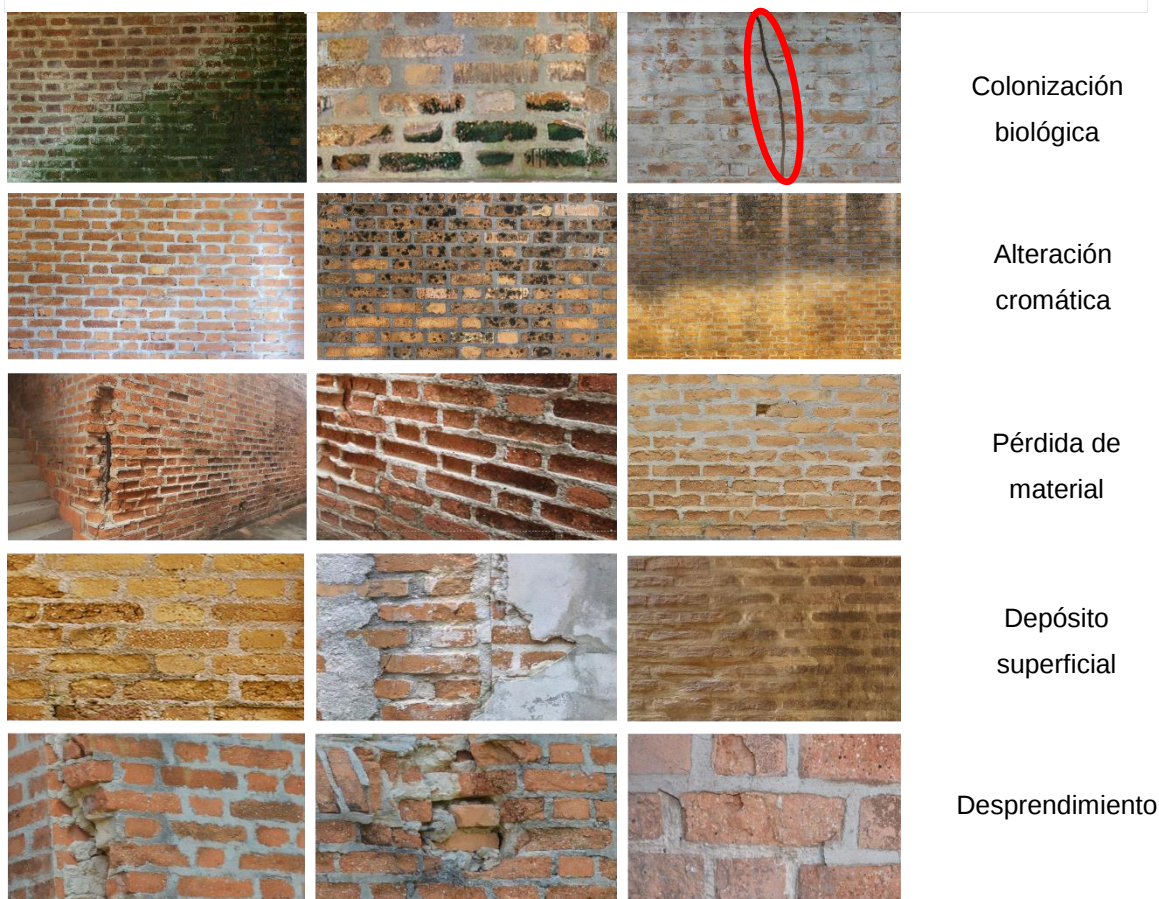


Fig. 1. Ejemplos de deterioros identificados en las fotografías de paredes y muros. Fuente: elaborada por la autora.

Según ICOMOS-ISCS (2003), las formas de deterioro que afectan materiales como la piedra y el ladrillo pueden clasificarse en distintos grupos según sus manifestaciones físicas y químicas. Entre ellos se encuentran:

- **Colonización biológica:** Se refiere al crecimiento de microorganismos como hongos, líquenes y algas sobre la superficie del ladrillo, lo que puede acelerar su degradación al generar ácidos orgánicos y aumentar la retención de humedad.
- **Alteración cromática:** Cambios en el color del ladrillo debido a factores como la exposición a contaminantes, la humedad o la cristalización de sales, lo que puede provocar manchas, oscurecimiento o decoloración.
- **Pérdida de material:** Se manifiesta en la erosión, disgregación o desprendimiento de fragmentos del ladrillo, causada por la acción del agua, la contaminación o la cristalización de sales solubles.

- Depósito superficial: Acumulación de sustancias externas como polvo, hollín, sales o contaminantes sobre la superficie del ladrillo, afectando su apariencia y acelerando su deterioro.
- Desprendimiento: Separación de capas o fragmentos del ladrillo debido a procesos de deterioro internos o externos, como la humedad, la cristalización de sales o la acción mecánica.

1.3 Análisis del impacto de las variables ambientales y su integración en el modelo HBIM-SIG

El deterioro del PA está profundamente influenciado por múltiples factores ambientales, como la humedad relativa, la temperatura, la contaminación atmosférica, la radiación solar y otros elementos que generan efectos específicos en los materiales constructivos. Variables como la humedad relativa y los cambios de temperatura inciden en procesos como la expansión y contracción de materiales, afectando su integridad estructural, mientras que la contaminación atmosférica contribuye a fenómenos como la carbonatación, el depósito de partículas abrasivas y la decoloración de las fachadas (Broto, 2006; Rodrigo & Monk, 2004).

La presencia de humedad en las estructuras puede provocar daños significativos a lo largo del tiempo, debilitando los materiales de construcción y favoreciendo la proliferación de hongos y bacterias. Por lo tanto, es fundamental tomar medidas preventivas para evitar el deterioro de las edificaciones, como el adecuado mantenimiento de las instalaciones de drenaje y la aplicación de tratamientos impermeabilizantes. En (Rodrigo Ramos et al., 2004) se plantea que estas condiciones no solo impactan la estética de las edificaciones, sino que también comprometen su estabilidad a largo plazo.

La humedad por capilaridad, humedad relativa, y la presencia de agua subterránea (nivel freático) son factores cruciales. El agua transporta sales disueltas que degradan los materiales y provoca daños estructurales. La profundidad del nivel freático, tipo de suelo y humedad del suelo modulan este fenómeno.

La temperatura y radiación solar generan variaciones térmicas que provocan dilataciones y fisuras en los materiales. Las diferencias térmicas también afectan la humedad superficial y la aparición de organismos biológicos.

El viento, transporta contaminantes y partículas abrasivas que erosionan las superficies, además de influir en la distribución de humedad y contaminantes

que combinado con el tipo y orientación de la fachada influye en la incidencia solar y en la exposición a agentes climáticos, afectando la velocidad del deterioro.

La contaminación atmosférica por gases y partículas contaminantes aceleran la degradación química y física de los materiales constructivos.

Sobre este tema se han realizado numerosos estudios internacionales y nacionales que utilizan el enfoque sistémico. A nivel internacional se consultaron los siguientes autores: en Argentina, Prone (2005); en España, Asenjo, Nasarre de Goicoechea, Gutiérrez y Piñeiro (2009); Reyes, Silva, Pérez, Corvo, Martínez, Alonso y Quintana (2012) y García et al. (2012) y en Ecuador, Ortiz (2011). Estos autores plantean metodologías que valoran la incidencia de las variables, considerando las características del edificio y del entorno en el proceso de diagnóstico, a través de un estudio inductivo causa-efecto, con análisis puntual.

A nivel nacional han trabajado este tema autores como Pérez (2000), Tejera y Álvarez (2013) y Bueno y Querol (2013). Estos proponen metodologías para el diagnóstico de todas las lesiones presentes en el edificio, aunque no existe ninguna que individualice el estudio de la humedad por capilaridad y su efecto en el deterioro.

Los estudios anteriores revelan la necesidad de determinar cómo influyen estas variables en el comportamiento del deterioro y justifican la creación de nuevas herramientas y metodologías que permita determinar su interrelación en espacio y tiempo.

Para abordar esta problemática, el modelo desarrollado en esta investigación vincula las tecnologías HBIM y SIG con el objetivo de optimizar el diagnóstico del deterioro en edificaciones patrimoniales. La integración de estas tecnologías permite no solo documentar con precisión geométrica y material a través del HBIM, sino también analizar espacial y temporalmente las variables ambientales mediante los SIG, lo que proporciona un enfoque integral del diagnóstico (León Nieto, 2020; Flórez Traslaviña, 2022).

En la primera etapa de la investigación, se realizó una exploración inicial en la instalación para analizar las condiciones ambientales del entorno. El análisis se basó en información disponible de estaciones meteorológicas cercanas, estudios bibliográficos especializados y consultas con expertos en

conservación. A partir de ello, se identificó un grupo preliminar de variables ambientales que, según la literatura y la opinión de especialistas, tienen una incidencia significativa en el deterioro de las edificaciones. Entre estas variables destacan las precipitaciones, la temperatura del aire, la humedad relativa, la radiación solar, la dirección y velocidad del viento, la proximidad al manto freático y los contaminantes atmosféricos, como CO₂, NO₂, O₃, SO₂ y ruido (Broto, 2006; Flórez Traslaviña, 2022).

Aunque existen otras variables relevantes, como la salinidad, su inclusión habría requerido un análisis mucho más detallado, enfocado exclusivamente en su comportamiento y dinámica, lo que excedería el alcance de esta investigación. De igual manera, ser más específicos en cuanto a los tipos de materiales constructivos implicaría ampliar considerablemente el estudio. En cambio, se optó por seleccionar un conjunto de variables representativas que fueran coherentes con los deterioros identificados, el tipo de material predominante en la edificación (ladrillo) y la información técnica disponible.

El análisis de estas variables no solo permitió caracterizar las condiciones ambientales del área de estudio, sino también identificar los momentos idóneos para realizar mediciones e inventarios de los signos de deterioro. Los SIG desempeñaron un papel fundamental al mapear las zonas críticas y representar las variaciones espaciales de los factores ambientales seleccionados. Por ejemplo, mediante diagnósticos multicriterio, se pudo correlacionar la distribución de daños materiales con la exposición a contaminantes y otros factores ambientales (Iglesia et al., 2017; Flórez Traslaviña, 2022). Además, herramientas avanzadas como LiDAR y fotogrametría contribuyeron a generar datos tridimensionales detallados, integrando capas temáticas en un modelo único.

Si bien el modelo desarrollado enfrenta desafíos, como la falta de estándares de interoperabilidad y limitaciones de los softwares HBIM actuales, su aporte principal radica en ofrecer una herramienta eficiente que vincule los SIG con HBIM, permitiendo optimizar el diagnóstico y ampliar las posibilidades de gestión del PA. El presente trabajo no pretende abordar exhaustivamente todas las variables ni materiales existentes; en cambio, se enfoca en sentar las bases para un diagnóstico integral mediante la integración tecnológica, marcando un avance significativo en la conservación patrimonial.

1.4 Las tecnologías de la información geográfica en los estudios integrales del Patrimonio Arquitectónico

Las TIG se definen como un conjunto de técnicas y métodos que conciernen a diversas disciplinas. Estas engloban la Cartografía, (ciencia aplicada a la lectura, interpretación y elaboración de mapas), la Fotointerpretación, que atañe a la toma de fotografías aéreas para el estudio de la evolución de los territorios, la Teledetección, que utiliza los satélites como medio de toma de datos de la información espacial terrestre y los SIG, que hacen alusión a un conjunto de programas informáticos empleados para el análisis, tratamiento y representación de información espacial (Molero et al., 2022).

Las TIG conforman un conjunto amplio de tecnologías cada vez más difundidas, diseñadas y pensadas para gestionar, manejar, analizar y procesar información espacial (Montañez Chaparro & Rincón Garzón, 2015).

Se puede considerar bajo esa denominación diferentes tecnologías, temáticas y disciplinas académicas, entre ellas: Cartografía; Geodesia; Fotointerpretación; Fotogrametría; SIG; Teledetección; Sistemas de Posicionamiento Global (*GPS*, *GLONASS* o *Galileo*); Infraestructuras de Datos Espaciales-IDE; Geografía Voluntaria o Participativa (VGI) (ejemplo es *Google Map* o *Google Earth*, *Open Street Map*, etc, *Location-based services*; *Mobile geospatial technologies*; (m) Inteligencia Artificial, etc. (EOS Data Analytics, 2024).

▪ Ventajas del empleo de las TIG

La aplicación de las TIG tiene ventajas al permitir una mejor gestión de la información de la sociedad, del medio ambiente, turismo, recursos naturales, infraestructura urbana y de servicios como el monitoreo de políticas puestas en práctica; ahorro considerable de tiempo y costos; apoyo a la toma de decisiones y planificación; eficiencia y precisión en los resultados.

1.4.1 Áreas de aplicación de las TIG

En la actualidad, son muchas las esferas de la sociedad en las que estas tecnologías encuentran aplicación. Dentro de las áreas de aplicación de las TIG se pueden destacar (figura 2): meteorología, minería y geología, agricultura, medio ambiente, demografía, arqueología, energía y agua, seguridad, industria alimentaria, edificación y obra civil, comercio, electricidad y electrónica, educación, salud, sanidad, actividades físicas y deportivas, manejo y solución

de desastres, comercio, hotelería y turismo, construcción, servicios de arquitectura e ingeniería, transporte (cálculo de rutas, mantenimiento y conservación de la infraestructura vial), comunicación, marketing y geomarketing, infraestructura (mantenimiento, gestión y suministro de energía eléctrica, gas y aire acondicionado; de agua, actividades de saneamiento, gestión de residuos, etc.), administración pública, industria manufacturera, seguros, actividades inmobiliarias, peritajes jurídicos, etc.

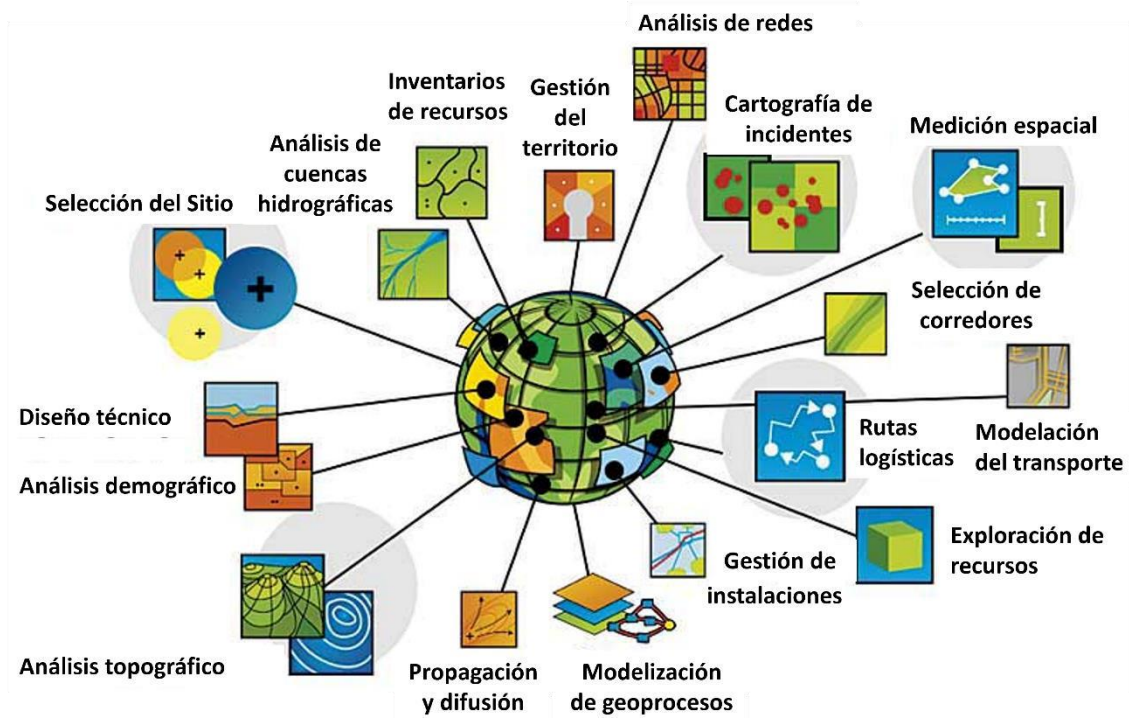


Fig. 2. Áreas de aplicación de las TIG. Fuente: Conferencia ESRI, 2019.

1.4.2 Las TIG aplicadas al estudio del patrimonio arquitectónico y su deterioro

En la actualidad, las TIG encuentran aplicación en múltiples ámbitos de la sociedad, destacándose especialmente en áreas como la elaboración de inventarios de recursos, el análisis de redes y la cartografía de incidentes. Asimismo, son fundamentales en la medición espacial, la selección de corredores y rutas logísticas, y la modelación del transporte.

Además, facilitan la exploración de recursos, la gestión de instalaciones y la modelización de geoprocesos, permitiendo la propagación de difusión y el análisis topográfico y demográfico. Son herramientas esenciales para el diseño técnico, la selección del sitio y el análisis de cuencas hidrográficas, así como para la gestión de territorios.

El uso de digitalización y modelado de los sitios del PA ha aumentado significativamente en los últimos años, lo que ocurre principalmente debido a los avances en las técnicas de escaneo láser, software de modelado 3D, técnicas de imagen basadas en el modelo y la potencia actual de las computadoras. Los métodos más usados son las herramientas CAD (Montagna & Pachiana, n.d.), el Modelado basado en imágenes (Antón García Tutora et al., 2019), modelado basado en distancia (*range-based modeling*) y la renderización (*Render - Rendering - Renderizado*, 2020).

Hoy en día, en el ámbito del PA las técnicas de levantamiento y de modelado digital en 3D, con el apoyo de sistemas cada vez más eficientes para la visualización de datos digitales, juegan un papel clave en la documentación de los bienes patrimoniales.

En el campo arquitectónico el escaneado de edificios constituye el primer paso con el que se obtienen modelos 3D que pueden ser utilizados para la visualización y análisis de las características de los edificios, gracias a herramientas informáticas de reconocimiento de patrones. La automatización de estas herramientas permite un ahorro temporal y supone una ayuda a los profesionales, por lo que cada vez más métodos se desarrollan con dicho objetivo. Existen investigaciones sobre métodos de segmentación de las maquetas 3D, procesos imprescindibles para llevar a cabo diagnósticos de la estabilidad y proyectos de consolidación en el PA.

Por otra parte, el campo del análisis geográfico, con centro en los SIG, se ha ido ampliando a través de la aparición de geodatos masivos ("*big data geographic*") y la Neogeografía que permite acceder a ellos con múltiples propósitos. La visión hacia ese horizonte es lo que conlleva a relacionar estas temáticas interdisciplinarias.

1.5 Los SIG en los estudios del PA

Los SIG son un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes (usuarios, *hardware*, *software*, procesos), que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos procedentes del mundo real que están vinculados a una referencia espacial, facilitando la incorporación de aspectos sociales, culturales, económicos y ambientales que conducen a la toma de decisiones de una manera más eficaz (Pérez-Guerra et al., 2023).

Es cualquier sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada. En un sentido más genérico, los SIG son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones. Son un conjunto de *hardware*, *software*, datos geográficos, personas y procedimientos; organizados para almacenar, actualizar, analizar y desplegar eficientemente rasgos de información referenciados geográficamente (Montañez Chaparro & Rincón Garzón, 2015).

Actualmente muchas disciplinas y especializaciones se están beneficiando de los SIG, ya que ha generado una reducción de costes y mejoras continuas en los componentes de *hardware* y *software* de los sistemas. Por ello ahora pueden ser encontrados en universidades, gobiernos, empresas e instituciones y se han aplicado a sectores como salud pública, criminología, defensa nacional, desarrollo sostenible, recursos naturales, la arqueología, la ordenación del territorio, el urbanismo, el transporte, la sociología o la logística, entre otros.

Tienen varias aplicaciones en el estudio del PA, entre ellas: (Olaya, 2014).

- Gestión y documentación: permiten la gestión y documentación de información detallada sobre edificios históricos, monumentos y sitios arqueológicos, incluyendo datos sobre su ubicación, estado de conservación, características arquitectónicas, historia, etc.
- Análisis espacial: posibilitan realizar análisis espaciales para identificar patrones y relaciones entre diferentes elementos del PA, como la distribución de edificios históricos en una ciudad o la relación entre un monumento y su entorno.
- Planificación y conservación: Son útiles para la planificación de intervenciones de conservación y restauración en edificios históricos, ya que permiten visualizar y analizar la información necesaria para tomar decisiones informadas sobre cómo preservar el PA.
- Divulgación y difusión: Pueden utilizarse para crear mapas interactivos y recorridos virtuales que permitan a los usuarios explorar el PA de forma digital, facilitando su divulgación y difusión.

1.6 La metodología BIM y su empleo en el estudio del deterioro del PA

La Metodología BIM en el mundo está en continuo desarrollo y en los últimos años está teniendo cada vez más uso en el sector patrimonial. En el presente epígrafe se tratan los aspectos relacionados con esta temática, el modelado de edificios históricos y el modelado 3D a través de herramientas BIM y el estado actual de las investigaciones que se realizan para la integración con los SIG a nivel internacional.

El BIM se define como una metodología de trabajo colaborativa con procesos inteligentes que brinda las herramientas necesarias para construir y administrar edificios e infraestructuras de manera eficiente (Choclán et al., 2015), es el proceso de generación y gestión de datos del edificio durante todo su ciclo de vida (fase de diseño, construcción, mantenimiento y demolición) utilizando *software* de modelado 3D y respalda la renovación, el mantenimiento, la construcción y las operaciones de activos, durante todo el ciclo de vida del edificio (Yuste, 2019).

El BIM también es considerado un conjunto asociado de procesos para producir, comunicar y analizar la construcción de modelos paramétricos (J. A. Ramírez, 2018).

Los objetos no son representaciones, sino entidades definidas según sus características que después se generan y muestran a través de todo tipo de vistas especializadas (como plantas, secciones etc.); lo que permite que, al hacer cualquier modificación en el modelo, automáticamente todas las vistas se actualizan eliminando posibles incoherencias. Para que el modelado sea controlable y rápido los elementos se definen como objetos paramétricos cuyas características y comportamientos vienen preestablecidos.

El término paramétrico se refiere a las relaciones existentes entre todos los elementos del modelo que permiten la coordinación y la gestión de cambios del *software*. Esta tecnología, permite cuantificar eficazmente los parámetros no formales de un edificio (mediciones, volúmenes de aire, recorridos de evacuación, consumo energético y otras variables que no son tratables desde el punto de vista de las herramientas de representación tradicionales) (J. A. Ramírez, 2018).

La concepción del significado de BIM ha ido variando y evolucionando, interpretándose de diferentes maneras según la perspectiva de las investigaciones. Como análisis de las anteriores definiciones y otras bibliografías, se puede argumentar que posibilita gestionar digitalmente la información real de los objetos desde su diseño, creación, su tiempo de explotación, mantenimiento y hasta su demolición. Facilita no solo la visualización en 2D y 3D que brindan información geométrica, sino, el proceso de planificación de tiempos (4D), gestión de los costos (5D), simulaciones de eficiencia energética (6D) y el mantenimiento del edificio durante toda su vida funcional (7D) (Yuste, 2019).

Un modelo 3D es una representación gráfica que recoge las características más esenciales del activo o espacio, como su forma y textura. En contraste, un modelo BIM va más allá al integrar no solo las características físicas, sino también otra información basada en datos. Algunos ejemplos de esta información adicional incluyen detalles sobre materiales, planificación y tiempos de construcción. Un Modelo 3D aporta información geométrica y visual, útil para crear espacios y objetos en 3D y conocer las dimensiones de cada estancia.

Un modelo BIM, además de la información geométrica, aporta informaciones basadas en datos. Se utiliza para documentar el edificio y tiene múltiples aplicaciones, como la detección de interferencias entre disciplinas, la planificación y seguimiento de obra, el cálculo de costes, el análisis de eficiencia energética etc.

Lo que significa que, un modelo 3D no es lo mismo que un modelo BIM. El BIM es una metodología de trabajo colaborativa que se enfoca en la información y ofrece utilidades en todo el ciclo de vida de un activo, desde el diseño hasta la operación y mantenimiento.

Existe una amplia variedad de programas informáticos y plataformas BIM, lo cual permite que sean utilizados en diferentes disciplinas antes mencionadas. La ventaja de la metodología BIM es que independientemente del software utilizado, se puede trabajar finalmente en un único modelo que recoge toda la información sobre un edificio. Como ejemplos de *software* utilizados se encuentran: ArchiCAD, Allplan, AECOsim, Tekla, Navisworks, Synchro, Cype,

Cost-It (Presto), Aecosim (Bentley Systems), Vectorworks (Nemetschek), Edificius (ACCA Software), AutoCAD Civil 3D y Revit.

Para el modelado 3D en la contrastación de esta tesis se emplea el Revit, desarrollado para Windows, por ser el más utilizado gracias a su fácil manejo y operatividad entre sus disciplinas (arquitectura, instalaciones y estructura) dentro del diseño arquitectónico y constructivo. Su capacidad para aprovechar como ningún otro *software* la metodología de trabajo colaborativo BIM es la que lo ha conducido hasta la posición dominante en el mercado (Piles Navarro, 2016).

En el empleo de la metodología BIM se utilizan los LOD (*“Level of Development”*) como herramienta para el proceso de diseño BIM. Se puede definir como el grado de confianza del equipo de diseño sobre la geometría e información del proyecto en cada momento del ciclo de vida de la estructura. Establece unas escalas LOD100, LOD200, LOD300, LOD350, LOD400 y LOD500, que impone determinados requerimientos de desarrollo gráfico y cantidad de información asignada al elemento modelado. Es un índice que permite informar al usuario del modelo sobre el desarrollo en cada instante del proceso de la construcción de una estructura (Liébana & Gómez Navarro, 2015).

En esencia los LOD definen el nivel de desarrollo o madurez de información que posee un elemento del modelo y este es la parte de un componente, sistema constructivo o montaje del edificio. El LOD en ningún caso se refiere a la totalidad del proyecto y tampoco tiene vinculación con la fase de desarrollo o construcción. Todos los niveles están determinados por: requerimientos de contenido del elemento, usos autorizados (análisis), coste, programación, coordinación, etc. (Imasgal, 2020).

La metodología BIM ofrece una base de datos que se pueden exportar mediante diferentes formatos de intercambio entre los que se encuentran *“Industry Foundation Classes”, (IFC), gbXML / DOE2 / Energy Plus, Dwg*, Hoja de cálculo *Excel*.

A partir de lo anteriormente analizado es preciso argumentar que existen diferentes *software* y formatos de trabajo para el empleo de la metodología BIM, los cuales constituyen una herramienta eficaz y precisa para ser utilizada en los proyectos de construcción, restauración, mantenimiento y conservación,

así como para la optimización de la gestión de datos posibilitando la interoperabilidad y el trabajo multidisciplinario.

1.7 El HBIM aplicado al Patrimonio Arquitectónico

A diferencia del BIM convencional, que se enfoca en la planificación, diseño, construcción y operación de edificios nuevos, el HBIM se centra en la documentación y preservación de edificios históricos y patrimoniales (Alubuild, 2023).

La aplicación del BIM a las estructuras existentes es posible gracias a la adquisición de nubes de puntos de alta calidad obtenidas mediante Escáner Láser Terrestre (ELT) o levantamientos fotogramétricos. Sobre esta base, se puede conseguir un modelo digital que represente con precisión el estado actual de los edificios y que, posteriormente, se utilice en una plataforma para la gestión colaborativa de datos. A lo largo de la última década se han llevado a cabo numerosas investigaciones centradas en el Modelado de Información de Edificios Históricos y se ha investigado ampliamente la capacidad del proceso para satisfacer los requisitos de los interesados en la conservación del patrimonio en términos de gestión de datos (Jouan & Hallot, 2019).

El proceso de ingeniería inversa está pensado para la transformación automática o semiautomática de nubes de puntos tridimensionales centrada en el *Heritage Building Information Modeling* (Modelado de información de edificaciones patrimoniales). La mayoría de los procesos semiautomáticos requieren un *software* complejo, en el que participan muchos expertos, ya que las plataformas digitales BIM actuales no pueden funcionar de forma automática. Incluir una nube de puntos densa de un edificio en esta plataforma digital es una de las dificultades (López, 2018), junto con el hecho de que los *softwares* BIM actuales no pueden hacer una segmentación semántica de la morfología de los elementos. Por lo tanto, la ingeniería inversa en los edificios patrimoniales es cada vez más compleja.

El proceso de modelación BIM está diseñado siguiendo una lógica constructiva: comienza con los elementos de la fase de cimentación y termina con la cubierta, las instalaciones y los elementos auxiliares. El proceso no tiene nada que ver con la ingeniería inversa, pues los datos masivos capturados a partir de la tecnología LiDAR muestran tanto la piel del edificio como los elementos unidos superficialmente a ella. Los datos se registran en archivos

con gran cantidad de información que no pueden utilizarse en las plataformas BIM. Por esta razón, se deben desarrollar nuevas estrategias relacionadas con la interoperabilidad de los sistemas de modelado precisos y especialmente las relacionadas con la gestión de datos y los nuevos escenarios sostenibles (Escudero, 2021).

La principal diferencia entre BIM y HBIM es la concepción del modelo digital al inicio del proyecto. Mientras que el primero implica el diseño del modelo desde la fase de boceto, el segundo requiere una representación digital del estado actual del elemento constructivo basada en un estudio completo y preciso, en la investigación histórica y en las observaciones in situ (Guáitara López, 2014). El HBIM es una biblioteca especial de objetos paramétricos BIM, diseñada como sistema multidisciplinar y en constante evolución para administrar, gestionar, documentar, conservar, mantener y reconstruir digitalmente el patrimonio (López, 2018). Uno de los principales problemas que se presenta en el desarrollo investigativo de esta temática es la complejísima reconstrucción digital de los componentes del edificio que tienen geometrías irregulares manteniendo sus propiedades y atributos, así como sus interrelaciones con los elementos constructivos circundantes.

Actualmente la mayoría de las plataformas BIM tienen incorporado una herramienta capaz de convertir los archivos de nubes de puntos a sus propios formatos de archivo, ayudando a los investigadores a acelerar el proceso de diseño y modelado 3D de los edificios y estructuras existentes. Sin embargo, a pesar de que las nubes de puntos proporcionan las formas y dimensiones de los objetos, estas pueden ser utilizadas únicamente como guías de referencia en los programas BIM, sin poder editarlas, pues existen como una abstracción subyacente al entorno del modelo.

1.8 Modelación 3D de edificios históricos a partir de maquetas 3D *reality based*

La documentación del PA se ve potenciado en los últimos años por el desarrollo tecnológico y de *software* para el procesamiento de información, así como la creación de herramientas para el modelado 3D y las técnicas de levantamiento, existen aún muchas incógnitas y líneas de investigación para lograr representar fielmente la realidad física del PA con información semántica. La modelación 3D del PA de morfologías complejas a partir de

maquetas 3D *reality based* (basada en la realidad) constituye una línea de investigación constante en busca de herramientas que permitan representar una realidad virtual de una geometría compleja, lo más optimizado posible y fiel a la realidad, para lo cual las técnicas de levantamiento constituyen un eslabón clave.

Las dos familias de instrumentos y métodos utilizados en el presente contexto son el escáner láser 3D y las técnicas fotogramétricas (Merlo & Aliperta, 2015). Los sensores tridimensionales son herramientas que permiten generar una imagen 3D del encuadre de una escena. Para ello se analizan los sensores que utilizan la radiación de luz, los cuales pueden ser activos (si la luz se codifica de manera que desempeñe un papel en el proceso de medición, ejemplos: escáner láser, herramientas para la proyección de luz estructurada, radar, estaciones totales, etc.) o pasivos (técnicas fotogramétricas, etc.) (Merlo & Aliperta, 2015). Tienen la capacidad de acelerar la recopilación de datos espaciales de edificios existentes o superficies complejas y obtener nubes de puntos que representan los objetos de la realidad.

Los Escáneres Láser Terrestres (ELT) son dispositivos que operan sobre un trípode o una plataforma estable y utilizan un fino rayo láser para explorar los objetos del entorno. En el proceso, cada punto de la superficie analizada recibe coordenadas (X, Y, Z) dentro del sistema de representación espacial, el cual se define en relación con la posición inicial del equipo. A través de esta tecnología, el escáner genera una nube de puntos que reproduce con precisión y detalle la geometría de los elementos registrados en un tiempo reducido. Existen distintos tipos de ELT, entre los que destacan aquellos que emplean triangulación, tecnología de diferencia de fase y medición basada en tiempo de vuelo, cada uno con características particulares que determinan su aplicación en diversos contextos de análisis patrimonial.

Los primeros calculan las medidas tridimensionales mediante la triangulación de los puntos o franjas del haz de láser que se proyectan sobre la superficie de un objeto y son los más precisos. Los sistemas de diferencia de fase emiten un haz de láser continuo y de potencia modulada. Su operación se basa en medir el cambio de fase entre las ondas emitidas y las recibidas, utilizando dicha medida para estimar las distancias con precisión. En los de tiempo de vuelo se mide el tiempo que tarda la emisión de un pulso de luz láser en alcanzar la

superficie escaneada y volver al detector receptor. Aprovechando que se conoce la velocidad de propagación, es posible calcular la distancia al objeto escaneado (Balletti et al., 2004).

Por otra parte, los métodos basados en el procesamiento métrico de las imágenes *image based* (basado en imágenes), requieren una formulación matemática precisa para transformar los datos extraídos de las imágenes en coordenadas métricas 3D. Las imágenes contienen toda la información necesaria para reproducir tanto la geometría como la textura del objeto fotografiado, haciendo posible la generación de modelos tridimensionales. En comparación con los sensores activos, los levantamientos fotogramétricos utilizan imágenes que contienen toda la información (geometría y textura) útil para la realización de modelos 3D. Además, a través de la fotogrametría es posible restituir, usando imágenes almacenadas, objetos o escenas que ya no están disponibles o se han dañado (Merlo & Aliperta, 2015).

El empleo de los datos proporcionados por imágenes tiene como ventajas fundamentales que se puede obtener un modelo 3D de puntos, (la resolución también depende de la distancia entre cámara y objeto), trabaja directamente con imágenes (buena información sobre el color) y el coste de los aparados es módico. Como desventajas fundamentales se encuentran que inicialmente el modelo 3D no está en escala (no tiene en cuenta los valores métricos del objeto); no proporciona un modelo 3D instantáneo donde no hay texturas y tampoco hay datos, los procedimientos de captura requieren experiencia del operador y la luz en la escena puede perjudicar la toma de las imágenes (Merlo & Aliperta, 2015).

A partir de lo anteriormente expuesto se puede argumentar que la principal ventaja del empleo de estas tecnologías radica en la calidad y cantidad de información tridimensional generada a partir de los datos obtenidos. Estos incluyen tanto la geometría como la textura de los objetos registrados, además de ofrecer rapidez en los levantamientos y un alto grado de precisión en los resultados. Sin embargo, para aprovechar plenamente estas capacidades, resulta fundamental contar con personal preparado y experimentado, capaz de interpretar, enriquecer y transformar la información en productos útiles para la conservación y gestión del patrimonio arquitectónico.

Para alcanzar un mejor resultado, es ideal la combinación de las dos tecnologías, las que permiten obtener un modelo tridimensional basado en la realidad de los objetos (*reality-based*) a partir del levantamiento (Hernández Peña *et al.*, 2024).

Es importante señalar que el proceso para generar modelos BIM a partir de datos de nubes de puntos es factible para las superficies regulares e irregulares de los monumentos patrimoniales. Sin embargo, esta es una tarea complicada, que requiere aumentar los conocimientos previos sobre el edificio analizado ya que la mayoría de las veces será necesario comenzar su modelado desde cero (López, 2018).

La generación de modelos precisos que revelen la geometría no se limita a programas informáticos de modelado geométrico “puro”, cuyo resultado no es un BIM. Las herramientas de modelado paramétrico, las relaciones y los atributos pueden añadirse para obtener un HBIM completo y no sólo una reconstrucción geométrica para el modelado 3D. El modelo final debe ser un producto interoperable para los paquetes BIM comunes (*Revit*, *ArchiCAD*, *Teckla*, etc), en el que las herramientas de modelado paramétrico, las relaciones y los atributos puedan conservarse con formatos de archivo interoperables (Barazzetti *et al.*, 2015).

1.9 Antecedentes y estado actual de la Integración de la metodología HBIM y los SIG

Una gran parte de las sociedades están experimentando una transición hacia la llamada “sociedad de la información” etapa de la evolución de la vida en nuestro planeta en la que la información y el conocimiento desempeñan un papel fundamental en la economía y en la vida cotidiana de las personas. Esta nueva realidad ofrece muchas oportunidades para preservar el patrimonio cultural para las generaciones futuras. Las tecnologías emergentes como la conexión 5G, las Smart Cities (Ciudades Inteligentes), los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) y el Internet of Things (IoT), precisan de una base digital de nuestro entorno 5G o lo que comúnmente empieza a llamarse un Digital Twin (Gemelo Digital), en el cual todo este tipo de tecnologías se apoyan en una base de datos hiperconectada.

Estos datos recopilados en varios formatos suelen ser gestionados a través de tecnologías como el BIM y los SIG. El BIM se puede utilizar para crear,

gestionar y compartir los datos del ciclo de vida de instalaciones verticales como edificios, mientras que SIG se puede utilizar para almacenar, gestionar y analizar datos que describen el entorno urbano.

La tecnología BIM intenta modelar todos los aspectos de los edificios (Manuel & Salazar, 2017), incluidas sus estructuras y apariencias, así como atributos como el propietario, la historia y el costo, con fines de análisis estructural, análisis energético, estimación de costos de construcción o mantenimiento de edificios. Mientras que los SIG tienen sus mayores potencialidades en la gestión de la información espacial, el análisis espacial y estadístico y la modelación de fenómenos naturales y de la propia sociedad (Flórez Traslaviña, 2022).

El BIM y los SIG tienen sus raíces en diferentes áreas de conocimiento. El BIM sirve al dominio de arquitectura, ingeniería y construcción / gestión de instalaciones, al proporcionar modelos de construcción 3D detallados que podrían usarse durante todo el ciclo de vida de un proyecto de construcción, incluido el plan, diseño, construcción, operación y su mantenimiento (María et al., 2022), mientras que SIG analiza y visualiza problemas relacionados con la ubicación, la influencia del entorno y las características físico geográficas en la instalación a partir del análisis espacial y estadístico de datos espaciales del entorno de la edificación (Flórez Traslaviña, 2022).

El uso de modelos digitales de información en los procesos de tutela del PA constituye hoy día un activo campo de experimentación e innovación, no tanto en la proposición de nuevas herramientas, sino en el desarrollo de adecuaciones y ajustes de estas a requerimientos como su conocimiento, conservación, difusión y gestión en general. Sin embargo, la complejidad de los procesos digitales relacionados con estos modelos, y el restringido acceso a los mismos por parte de aquellas disciplinas y actores implicados en la gestión patrimonial, aún supone un freno para su aplicación a problemas reales (María et al., 2022).

La recuperación virtual del patrimonio histórico es altamente compleja debido a que la geometría que presentan no suele tener elementos estandarizados. Debido a las dimensiones de los edificios y el alcance espacial del BIM se suelen utilizar escalas muy grandes para la representación de la infraestructuras y los bienes patrimoniales, por lo general se emplean sistema

de coordenadas cartesianas o planas rectangulares, por el contrario, los SIG suelen ser utilizados para representar, analizar y modelar los objetos y fenómenos de la naturaleza y la sociedad que pueden ser representados en 2D o 3D empleando diferentes escalas que pueden ir desde la planetaria hasta la local.

Por lo tanto, la aplicación integrada de BIM y SIG es esencial en las aplicaciones donde se requieren datos tanto de las instalaciones como del entorno espacial que lo rodean, sin embargo, esta integración no ha resultado fácil debido a las diferencias que existen entre estas tecnologías en términos de: enfoques, alcances, escalas de trabajo y generación de datos (Flórez Traslaviña, 2022). Atendiendo a las ventajas que trae su integración, ha atraído la atención e interés de investigadores entre otras razones por su aplicación a una gran diversidad de campos, desde la respuesta a emergencias, el análisis de los problemas ambientales como la contaminación por ruido, los riesgos por sismos, hasta la utilización más eficiente de la iluminación natural y las temperaturas y los estudios del deterioro de los inmuebles (Maltseva et al., 2024).

La interoperabilidad entre HBIM y SIG ha sido ampliamente reconocida como una estrategia clave en la gestión del patrimonio cultural, facilitando el análisis espacial y la modelización precisa de estructuras históricas. Montero Vilar (2023) enfatiza la importancia de estas tecnologías para la gestión de riesgos, destacando cómo la combinación de SIG con modelos BIM permite una mejor evaluación de los factores ambientales que afectan la conservación del patrimonio. Del mismo modo, el proyecto HBIMSIGTUR (s.f.) aborda la integración de ambos sistemas en la planificación turística del patrimonio, promoviendo la toma de decisiones fundamentadas en datos geoespaciales. La complementariedad entre estas herramientas no solo optimiza la documentación del patrimonio, sino que también refuerza la implementación de estrategias de preservación basadas en un análisis multidimensional del entorno construido.

A pesar de las ventajas de esta integración para el estudio de cualquier edificación y en particular de los inmuebles patrimoniales, la integración ha sido un desafío. La necesidad de combinar datos provenientes de varias fuentes y formatos diferentes garantizando la interoperabilidad entre ellos, ha sido un

reto entre otras razones por la complejidad técnica para lograr esta integración, es por ello que la mayor parte de los estudios se han concentrado en el descubrimiento de nuevos formatos de datos que permitan el vínculo (Iglesia et al., 2017), mientras otros han concentrado sus esfuerzos en la búsqueda de nuevas metodologías y enfoques que permitan la integración de la documentación, bajo un modelo de datos común, que facilite la interoperabilidad y la accesibilidad a la información archivada, y su posterior gestión (Castán et al., 2022). Otros estudios se han centrado en el diseño de sistemas y metodologías que permitan extraer información relevante a partir de datos 2D (fotografías, termografías, imágenes multiespectrales) y datos 3D (nubes de puntos tridimensionales) (Jouan & Hallot, 2019b).

Entre los programas informáticos más avanzados en este campo y que han facilitado la integración de estas tecnologías HBIM-SIG está Autodesk Infravork, sin embargo, muchos de ellos son privados.

La integración de HBIM y SIG para el estudio del deterioro en edificaciones patrimoniales ha generado importantes avances metodológicos. Algunos trabajos han puesto su foco en: automatizar el reconocimiento de elementos arquitectónicos, cómo optimizar la gestión mediante integración tecnológica, Integrar nubes de puntos en conservación patrimonial y en la formación de especialistas en el manejo de estas tecnologías (Hernández Peña et al., 2024). Mientras otro grupo de autores han explorado la digitalización de los procesos de conservación preventiva, la automatización en la detección de patologías a través de la tecnología HBIM-SIG, y el diagnóstico del estado estructural en edificios históricos y como priorizar intervenciones mediante el HBIM-SIG, en este tercer grupo de investigaciones es donde se enmarca la presente tesis.

Las últimas investigaciones provenientes de la Universidad Politécnica de Madrid destacan el potencial de los SIG 3D para cartografiar variables dinámicas como la propagación de humedad, creando mapas de riesgo actualizables que se integran con modelos HBIM. Este enfoque híbrido permite no solo documentar el estado actual, sino también predecir y mitigar procesos degradativos mediante análisis espacial avanzado.

En la actualidad con el surgimiento de las nuevas fuentes de datos masivas “Big Data” por medio de sensores y dispositivos, se ha potenciado el interés por la representación espacial de los datos, en este campo. Estudios recientes

emplean estas nuevas tecnologías para la gestión de datos de edificaciones (Navas, 2018). El empleo de la Inteligencia Artificial (IA) ha sido otra de las aplicaciones visibles hoy en día, que se ha empleado de forma innovadora para la difusión del PA (Couceiro, 2021) o el reconocimiento automático de formas en las edificaciones (León Nieto, 2020). La mayoría de las aplicaciones aprovechan del Machine Learning ya sea para hacer pronósticos sobre cumplimientos de plazo y costo de la planificación o aplicando visión artificial para el control de seguridad, medición de avance y de productividad o detección de daños en estructuras.

El desarrollo de herramientas de aprendizaje automatizado “Deep Learning” basado en redes neuronales es otro de los campos utilizados en la actualidad para la detección automática de fisuras en superficies de hormigón, lo cual es una tarea importante en temas de estructuras, debido a que estas pueden provocar problemas graves, trabajos recientes han apuntado hacia diferentes maneras de realizar una clasificación y segmentación de grietas con imágenes recibidas, (León Nieto, 2020).

En el futuro se espera que las tecnologías HBIM-SIG en los estudios del patrimonio arquitectónico continúe evolucionando y teniendo un impacto significativo en la forma en que se documentan, gestionan y conservan las edificaciones históricas en donde la integración de los datos en tiempo real, proveniente de sensores y dispositivos de LOT, facilite el monitoreo continuo del estado de los edificios históricos y la detección temprana de los deterioros.

En resumen, la búsqueda bibliográfica realizada en este capítulo permitió demostrar que la integración de las metodologías HBIM y SIG ha generado avances significativos en la documentación, gestión y conservación del Patrimonio Arquitectónico. A través del análisis de diversas investigaciones, se ha evidenciado la importancia de la interoperabilidad entre estas tecnologías para optimizar el diagnóstico del deterioro en edificaciones históricas. Se han identificado metodologías que permiten correlacionar factores ambientales con procesos de degradación estructural, además de mejorar la planificación de intervenciones mediante herramientas digitales avanzadas. Asimismo, la revisión de estudios recientes destaca el potencial del aprendizaje automatizado y la inteligencia artificial en la automatización del reconocimiento

de patologías, consolidando el uso de estas herramientas como un recurso clave en la preservación patrimonial.

La vinculación de los SIG con el HBIM para el estudio de los deterioros a partir de la influencia que ejercen las variables ambientales constituye una rama de investigación poco explorada, y con un elevado potencial de aplicación, a partir de las ventajas que ofrecen estas dos tecnologías. Sin embargo, los resultados alcanzados hasta este momento no permiten aún la generalización de este vínculo en los estudios del PA, debido a: 1) la falta de estandarización en los formatos de datos y la interoperabilidad entre plataformas HBIM y SIG, lo que dificulta la integración fluida de la información; y 2) la carencia de metodologías consolidadas que permitan analizar de forma eficiente la influencia de las variables ambientales en el deterioro del PA a través de la combinación de estas tecnologías (Hernández Peña et al., 2024).

La integración de SIG y HBIM en el análisis de deterioros, considerando la influencia de las variables ambientales, representa una línea de investigación poco explorada, pero con un alto potencial de aplicación. La combinación de estas tecnologías permite aprovechar sus ventajas para la conservación del PA; sin embargo, los resultados obtenidos hasta el momento no garantizan la generalización de esta metodología en los estudios patrimoniales debido a: 1) la falta de estandarización en los formatos de datos y la interoperabilidad entre plataformas HBIM y SIG, lo que dificulta la integración fluida de la información; y 2) la carencia de metodologías consolidadas que permitan analizar de forma eficiente la influencia de las variables ambientales en el deterioro del PA a través de la combinación de estas tecnologías (Hernández Peña et al., 2024).

Con respecto al software para trabajar en entornos HBIM, se ha evidenciado la falta de idoneidad del software de modelado BIM al tratar con datos 3D complejos de monumentos históricos, así como la necesidad de una plataforma en la que se pueda llevar a cabo todo el proceso de flujo de trabajo que involucra la generación de los modelos. Si bien Revit se considera idóneo entre los softwares BIM para la modelación 3D, presenta limitaciones para representar las complejidades geométricas del PA. Estas limitaciones se complementan mediante la vinculación con modelos generados a partir de

técnicas fotogramétricas aéreas y terrestres, permitiendo así una representación más fiel y precisa del patrimonio (López, 2018).

1.10 Conclusiones parciales capítulo 1

El capítulo sienta las bases necesarias para el estudio y conservación del patrimonio arquitectónico, subrayando el valor cultural, histórico y social de las edificaciones patrimoniales. La integración de tecnologías avanzadas, como HBIM y SIG, se plantea como una solución innovadora para garantizar la documentación, análisis y preservación eficiente de los bienes. El enfoque metodológico refuerza la importancia de utilizar herramientas digitales para enfrentar los desafíos que plantea el deterioro estructural en contextos patrimoniales.

Se argumenta que las TIG y los SIG desempeñan un papel crucial en la gestión y análisis de datos espaciales. Estas tecnologías permiten una planificación estratégica y una toma de decisiones más precisa y fundamentada, optimizando la preservación del patrimonio arquitectónico. Su aplicabilidad en diversos contextos patrimoniales demuestra su capacidad para adaptarse a necesidades específicas, consolidándolas como herramientas indispensables.

La modelación en 3D, basada en maquetas reality-based, se presenta como un avance técnico que ofrece una representación altamente precisa de la realidad física del patrimonio arquitectónico. Estas técnicas no solo son útiles para documentar el estado actual de las edificaciones, sino también para prever escenarios futuros y diseñar estrategias de intervención. El enfoque resalta la capacidad de integrar la documentación gráfica y geométrica en modelos tecnológicos avanzados.

El caso de estudio de las Escuelas de Arte de Cubanacán ilustra claramente los beneficios de aplicar tecnologías como HBIM y SIG en la conservación del patrimonio arquitectónico. Sin embargo, también pone de manifiesto los desafíos inherentes a la digitalización y representación gráfica del PA, tales como la necesidad de equipos especializados y la formación técnica adecuada. El análisis refuerza la necesidad de avanzar en la investigación y aplicación de estas herramientas en contextos locales y globales.

Se enfatiza la importancia de registrar y documentar digitalmente los bienes patrimoniales para asegurar su preservación frente al paso del tiempo y los efectos ambientales. La combinación de tecnologías como HBIM, SIG y

técnicas de modelación tridimensional garantiza una base sólida para desarrollar estrategias sostenibles de conservación.

El capítulo demuestra la necesidad de abordar la conservación patrimonial desde un enfoque interdisciplinario, integrando conocimientos arquitectónicos, tecnológicos y ambientales. Los antecedentes revisados destacan las limitaciones actuales en el diagnóstico del deterioro y justifican la creación de un modelo que permita vincular de manera eficiente el impacto ambiental con las características estructurales.

CAPÍTULO 2

**PROPUESTA DE UN MODELO (HBIM-SIG) PARA
EL DIAGNÓSTICO PATOLÓGICO DEL
PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO**

CAPÍTULO 2. PROPUESTA DE UN MODELO (HBIM-SIG) PARA EL DIAGNÓSTICO PATOLÓGICO DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO

En la presente sesión se propone un modelo que integra las herramientas del HBIM con los SIG para el estudio del deterioro en el que se emplean las potencialidades de ambas tecnologías en la solución de esta problemática. El modelo diseñado es extrapolable a otros territorios y casos de estudio, el mismo descansa, en considerar varios factores ambientales y tecnologías y en donde el proceso no es totalmente automatizado y requiere la intervención de los expertos en varios momentos, para construir los resultados esperados.

El desarrollo de un modelo que vincula las tecnologías SIG y HBIM implica afrontar el desafío de integrar escalas urbanas y arquitectónicas en los métodos de diagnóstico, análisis y propuestas de intervención. Estas escalas, aunque distintas en objetivos y enfoques, se articulan en el presente modelo mediante un ciclo que asegura una transición coherente entre los datos generales y el detalle intrínseco de las edificaciones.

El ciclo comienza con el estudio de las variables ambientales a escala urbana, basado en información obtenida de estaciones meteorológicas cercanas y en estudios previos realizados en la zona, cuando están disponibles. El primer paso permite identificar de manera general las variables que inciden con mayor relevancia en el deterioro de las edificaciones. Posteriormente, mediante el análisis espacial en los SIG y utilizando métodos de interpolación y modelación espacial, los datos se ajustan a una escala más detallada, adecuada a las particularidades de la edificación estudiada.

En esta fase, se realizan mediciones directas de las variables ambientales con mayor impacto en el área de estudio, como humedad relativa, temperatura y contaminación atmosférica. Estas mediciones se integran con las bases de datos del modelo HBIM, lo que permite pasar de una escala pequeña a una escala arquitectónica más detallada, donde se representan las condiciones específicas del inmueble. Una vez vinculados los datos ambientales y materiales en el modelo HBIM, puede ampliarse para representar múltiples edificaciones conectadas a través del SIG, detallando el comportamiento de las variables ambientales en distintos inmuebles de áreas urbanas completas.

Esta integración inversa (de lo detallado a lo global) permite que varios modelos HBIM estén vinculados al SIG, facilitando una representación integral

que abarca zonas urbanas completas. Todo lo que no solo posibilita un diagnóstico específico por edificación, sino que también habilita un monitoreo continuo y actualizado de las condiciones ambientales y su influencia en múltiples inmuebles patrimoniales. El enfoque iterativo asegura que el ciclo pueda repetirse y actualizarse continuamente, adaptándose a las dinámicas cambiantes de las variables ambientales y a la evolución de los deterioros en las edificaciones.

La precisión en la integración de escalas influye directamente en la calidad del diagnóstico y las propuestas de intervención. Desde la escala urbana, el SIG permite mapear dinámicas territoriales y detectar patrones de impacto ambiental, mientras que, desde la escala arquitectónica, el HBIM documenta con alta resolución las características geométricas y materiales. El enfoque integrado no solo enfrenta el desafío de coordinar métodos y equipos con objetivos diversos, sino que también proporciona un marco holístico para gestionar de manera eficiente los recursos destinados a la conservación del PA.

En síntesis, la mezcla de escalas en el modelo HBIM-SIG amplía significativamente el alcance y la aplicabilidad de las tecnologías empleadas, permitiendo conectar dinámicas territoriales con especificidades locales. El enfoque iterativo, basado en un ciclo continuo de análisis y actualización, representa una innovación clave en el diagnóstico y gestión del patrimonio arquitectónico.

2.1 Fuentes de información y herramientas

De acuerdo con los objetivos de la investigación, las principales fuentes de información incluyen datos obtenidos mediante levantamientos con tecnología ELT, vehículos aéreos no tripulados (VANT), cámaras fotográficas y mediciones in situ de las variables ambientales seleccionadas, como temperatura, humedad relativa, dirección predominante del viento, exposición a la radiación solar y cercanía al manto freático. Otros factores, como la concentración de contaminantes y niveles sonoros, son descartados tras verificarse que no presentan variaciones significativas dentro del área de estudio.

Las fuentes complementarias incluyen registros históricos de las variables climáticas proporcionados por la estación meteorológica de Casa Blanca,

información de estaciones cercanas, y una base cartográfica digital desarrollada por el Grupo Empresarial GEOCUBA (2019-2023).

Los mapas temáticos de las variables ambientales se generan con datos recopilados en el área de estudio. La ubicación de los puntos de medición sigue un muestreo aleatorio (Hernández León & Coello González, 2000), asegurando que sean accesibles y representen adecuadamente las características constructivas de la instalación.

El inmueble analizado cuenta con paredes y muros interiores y exteriores distribuidos en dos niveles, lo que genera desafíos para la representación cartográfica y la extracción de valores de las variables ambientales. Para resolver estas dificultades, se desarrolla una aplicación informática que integra los resultados del SIG con la representación tridimensional generada mediante HBIM.

Las herramientas de análisis espacial y modelación en SIG son esenciales en el modelo. Se aplican desde la construcción de mapas temáticos de variables como la humedad relativa y la temperatura (mediante el método de interpolación espacial Kriging, basado en Olaya, 2014, y Porras Velázquez, 2017), hasta la modelación de horas de sol y sombra a lo largo del año. También se utilizan para identificar las superficies más expuestas a la dirección predominante de los vientos y extraer los valores de las variables ambientales que alimentan el modelo matemático desarrollado.

Adicionalmente, se aplican técnicas de evaluación multicriterio (EMC) (Imhof Verlag, 2014; Remond et al., 2018) para generar mapas que representen la gravedad del deterioro y las prioridades de intervención, integrando la severidad y las manifestaciones de deterioro observadas.

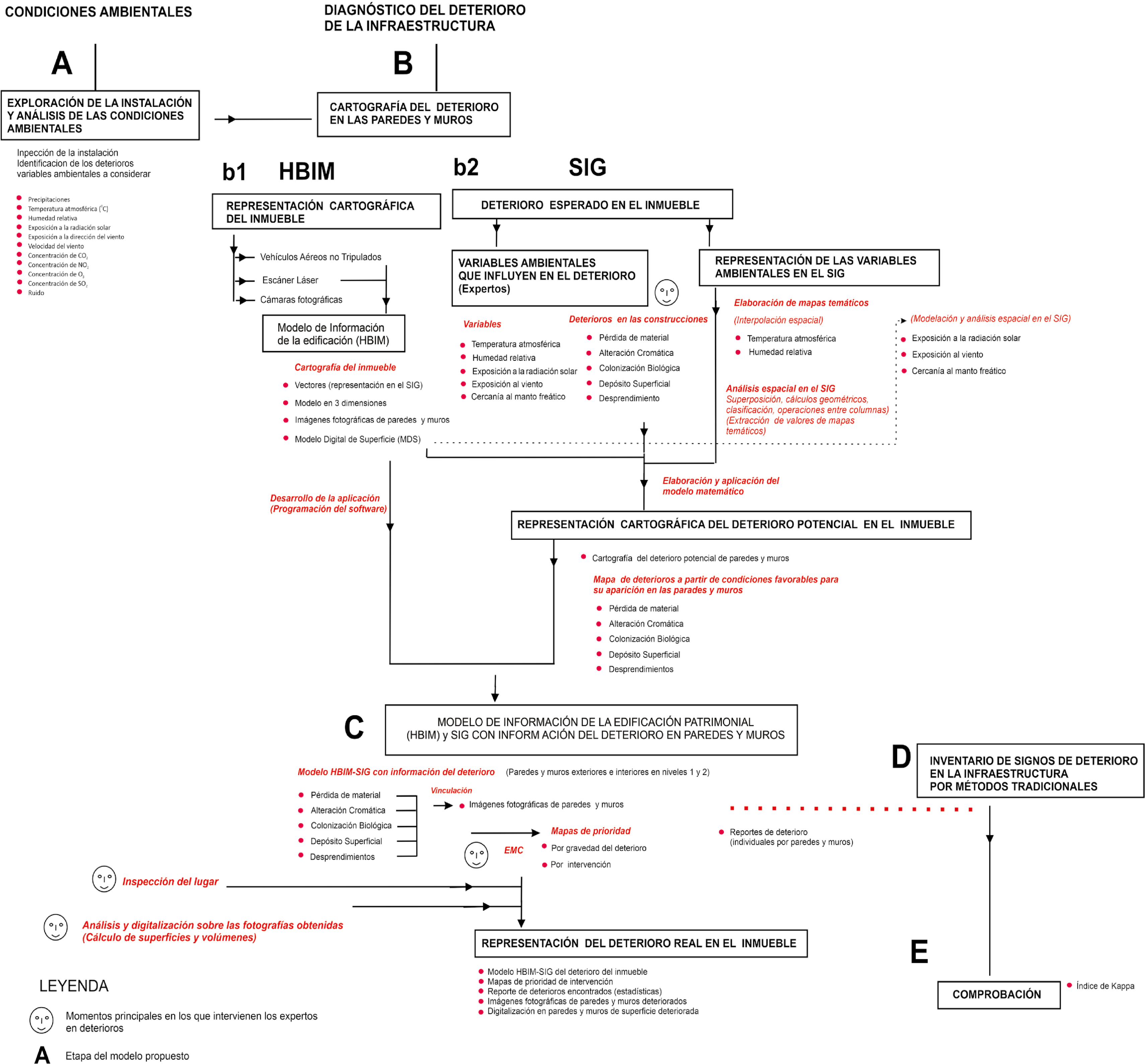
En el caso de los SIG, se emplearon ArcGIS (versión 10.8) y QGIS (versión 3.28) como parte de la estrategia de investigación. Uno de los objetivos del estudio fue evaluar si el software libre QGIS era capaz de realizar todas las operaciones de análisis y modelación necesarias para el modelo propuesto. Se sabía que ArcGIS ofrecía estas capacidades, pero, en ese momento, QGIS no incluía las herramientas para realizar evaluaciones multicriterio basadas en lógica difusa (*fuzzy logic*) que consideran el espacio continuo. Por esta razón, fue necesario recurrir a ArcGIS específicamente para el análisis. Sin embargo, recientemente, QGIS ha integrado un script que permite ejecutar el tipo de

evaluaciones, lo que habilita el uso completo del software libre en todo el proceso, ofreciendo una alternativa accesible y eficiente sin comprometer la calidad del análisis.

- A) Exploración de la instalación y análisis de las condiciones ambientales;
- B) Cartografía del deterioro en las paredes y muros;
- C) Construcción del modelo HBIM-SIG con información del deterioro en las paredes y muros;
- D) Inventario de signos de deterioro de la infraestructura por métodos tradicionales;
- E) Validación del modelo propuesto.

En las próximas secciones, se describen los procedimientos desarrollados en cada una de estas etapas, tal como se ilustra en la figura 3. El anexo 1 representa el esquema representado en la figura 3 pero más simplificado.

MODELO HBIM-SIG PARA EL DIAGNÓSTICO DEL DETERIORO DE INMUEBLES PATRIMONIALES



2.2 Exploración de la Instalación y análisis de las condiciones ambientales (A)

Los factores ambientales influyen significativamente en el deterioro de las construcciones. Los expertos destacan que las variaciones de temperatura provocan la expansión y contracción de los materiales, mientras que la humedad relativa y la temperatura alteran el punto de condensación del vapor de agua, humedeciendo las paredes. La acción de la lluvia y el viento sobre las fachadas puede ocasionar desprendimientos, y la contaminación ambiental generada por vehículos, industria y animales contribuye a cambios en la coloración de las superficies (Broto, 2006; Rodrigo & Monk, 2004; Rodrigo Ramos et al., 2004).

La consulta de expertos vinculados con el área de estudio, el análisis bibliográfico especializado y los recorridos realizados por el inmueble permiten identificar los deterioros existentes y las variables ambientales que los favorecen (Broto, 2006; Franceschi & Germani, 2021, 2024). Con base en los resultados se seleccionan las variables ambientales relevantes según su influencia sobre los deterioros detectados. Además, se determina el período óptimo para realizar el diagnóstico considerando el comportamiento anual de las variables ambientales.

2.3 Cartografía del deterioro en las paredes y muros (B)

La integración de los modelos HBIM y los SIG representa un enfoque innovador en el diagnóstico patológico de bienes arquitectónicos patrimoniales. A través del HBIM, se desarrollan modelos tridimensionales que permiten representar daños estructurales como fisuras y desprendimientos (Banfi, 2020).

Por otro lado, el SIG gestiona datos espaciales relacionados con factores externos como las condiciones ambientales y antropogénicas, generando mapas dinámicos de deterioro (Della Torre & Campanaro, 2018; Fiorini & Mezzapelle, 2019). La sinergia entre HBIM y SIG también facilita la visualización clara de áreas vulnerables, consolidando un modelo integral para proyectos de conservación del patrimonio (Murphy et al., 2013; Zlatanova & Isikdag, 2017).

En las siguientes secciones, se explican en detalle las herramientas utilizadas para elaborar la cartografía de deterioro y sus aplicaciones específicas en la protección del patrimonio arquitectónico.

2.3.1 Representación cartográfica del inmueble (b1)

Esta fase del modelo utiliza tecnologías BIM y de teledetección para digitalizar la instalación. Los procedimientos permiten generar representaciones en dos y tres dimensiones, así como bases de datos detalladas de los elementos constructivos del inmueble. Los productos obtenidos incluyen levantamientos con vehículos aéreos no tripulados, escáner láser terrestre y cámaras fotográficas, que posibilitan la modelación HBIM y la creación de un modelo digital completo (Blanca & Ntas, 2014; Hernández Peña, 2019; Linet, 2019).

Por consiguiente, se obtienen cuatro resultados que son la base para la elaboración de otros análisis:

Vectores de las paredes y muros: Representados en dos dimensiones utilizando la proyección cónica conforme de Lambert (Elipsoide 1866), para interiores y exteriores por nivel de infraestructura.

Modelo tridimensional: Generado mediante nubes de puntos obtenidas con tecnologías ELT y VANT, constituyendo la base para modelos paramétricos en software BIM.

Imágenes fotográficas: Capturadas mediante fotogrametría terrestre para garantizar la calidad y facilitar la identificación visual de deterioros.

Modelo digital de superficie (MDS): Representación ráster que incluye altura del relieve y objetos sobre él, obtenida mediante tecnología LiDAR (Miquel & Tarongers, 2008).

La obtención de los cuatro resultados requiere un desglose del esquema tecnológico que describe los procesos necesarios para desarrollar la cartografía en paredes y muros, así como su representación en dos y tres dimensiones. Para alcanzar los objetivos, es fundamental transitar por una serie de etapas que estructuran y optimizan el flujo de trabajo, garantizando la precisión y coherencia en el análisis espacial.

Levantamiento digital del área de estudio: Recopilación de datos del entorno mediante escáneres láser terrestres, VANT y cámaras fotográficas.

Procesamiento de información: Generación de productos base a partir de los datos recopilados.

Modelación HBIM: Creación de representaciones en dos y tres dimensiones basadas en los datos procesados.

- **Levantamiento Digital en el área de estudio**

Durante el proceso de levantamiento digital se recopilan los datos del área de estudio y su entorno, utilizando diversas tecnologías y métodos de adquisición de información. Esta etapa incluye un reconocimiento preliminar de la zona, acompañado de trabajos preparatorios para asegurar el éxito del levantamiento. Posteriormente, se lleva a cabo el levantamiento directo en campo, lo que permite generar nubes de puntos mediante la integración de tecnologías como los ELT, VANTs y cámaras fotográficas (figura 4).

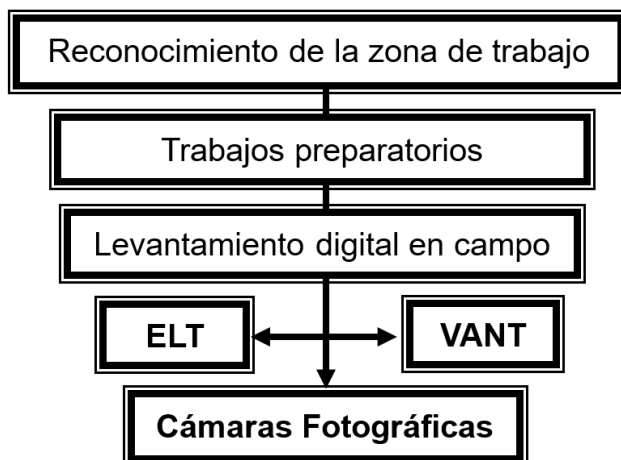


Fig. 4. Esquema del levantamiento digital. Fuente: elaborada por la autora.

Flujo de trabajo para el levantamiento digital

- **Reconocimiento de la zona de trabajo**

Se realiza un recorrido por la zona de trabajo para analizar los lugares y vías de acceso, garantizando que el levantamiento digital cubra toda el área sin omitir información relevante. Durante esta etapa, se verifica la información topográfica disponible, como los puntos cercanos de la red geodésica nacional, que pueden ser utilizados como base de apoyo. Se definen aspectos clave, como la ubicación de los instrumentos del ELT, los posibles puntos de despegue y áreas de aterrizaje para los VANTs, la influencia de la vegetación en la visibilidad, y los puntos desde los cuales se realizarán las tomas fotográficas con cámaras tradicionales. Todo lo que permite planificar y estimar el tiempo necesario para la ejecución del trabajo de manera eficiente.

- **Trabajos preparatorios**

Se prevén todos los procesos que serán ejecutados en campo, el aseguramiento logístico, el transporte hacia la zona de trabajo, el chequeo del estado técnico de la tecnología y equipamiento, el análisis de accesorios que se deben emplear según las características del lugar, el estado meteorológico, los permisos de vuelo, garantizar el estado de las baterías de alimentación de los instrumentos, se planifican las líneas de vuelo y otros aseguramientos para que no sea interrumpido el levantamiento.

En la etapa de gabinete se garantizan las condiciones mínimas necesarias para el procesamiento de la información, se definen los *software* a emplear, así como la base cartográfica y los insumos necesarios para apoyar esta tarea entre ellos: las imágenes para generación de las ortofotos, imagen satelital, informes, videos, etc.

Otro de los análisis previos consiste en el marco legal (normas, resoluciones, convenios) nacionales e internacionales, vigentes que se emplearían durante la definición de las técnicas de investigación y para la elaboración de los datos recopilados.

- **Levantamiento directo en campo**

Los trabajos de campo se llevan a cabo para obtener todos los datos necesarios mediante mediciones que permiten a través de su procesamiento la obtención de los productos bases que se emplean en las etapas posteriores para la gestión y diagnóstico del PA. El levantamiento considera el empleo de tres tecnologías proporcionadas por la empresa GEODESA y el Proyecto “Que no baje el telón”.

- ELT: Modelos Leica ScanStation P40, Leica ScanStation C10 y Leica RTC360 proporcionados por Geocuba (GEODESA) (figura 5-1).
- VANTs: Dron DJI Mavic 2 Pro (figura 5-2).
- Cámaras fotográficas: Cuatro cámaras Sony Alpha 6000 y una Hasselblad L1D-20c, garantizando un solapamiento de fotogramas superior al 60%, la distancia focal se situó entre 18 y 24 mm (figura 5-3).



Fig. 5. Tecnologías empleadas en el levantamiento digital. Fuente: elaborada por la autora.

- **Levantamiento con Escáneres láser terrestre**

El proceso permite obtener un modelo tridimensional de nubes de puntos de los interiores y exteriores de las instalaciones. Se realizan puestas de instrumentos en distintas ubicaciones para cubrir completamente el área, ajustando la densidad del barrido según las necesidades del trabajo.

Se emplean coordenadas obtenidas de la red geodésica nacional y dianas para vincular los levantamientos realizados con ELT, VANTs y cámaras tradicionales. Los resultados incluyen modelos tridimensionales con vistas reales que permiten realizar recorridos virtuales por las instalaciones.

- **Levantamiento con Vehículo Aéreo no Tripulado**

El levantamiento aéreo del área de estudio con VANT requiere un análisis previo utilizando imágenes de satélite y mapas temáticos disponibles. Luego, se planifica el vuelo para garantizar que cubra toda el área y, finalmente, se realiza el levantamiento. El proceso produce ortofotos, nubes de puntos, fotoplanos, modelos tridimensionales y el modelo digital de superficie, que sirven de base para obtener otros productos útiles en las siguientes etapas de la investigación. Es fundamental mantener las dianas o targets en el área de estudio, ya que permiten enlazar los datos de la fotogrametría terrestre y aérea.

- **Levantamiento con cámaras fotográficas**

Simultáneamente al levantamiento en campo con ELT y VANTs, se realiza la toma fotográfica con cámaras tradicionales ajustadas a la máxima resolución de imagen y formato. Dichos parámetros mejoran la calidad de las fotografías en el control del color de iluminación durante el proceso de revelado digital. Se fotografía el elemento desde distintos ángulos y perspectivas para captar una visión general del elemento y su entorno. Es importante incluir zonas comunes para facilitar la

unión entre fotografías. Las imágenes se toman de forma consecutiva, garantizando el solape y evitando áreas sin datos, y se asegura la adyacencia entre las zonas de trabajo para integrarlas posteriormente con las nubes de puntos del ELT.

- **Procesamiento de la información**

Se gestiona la interoperabilidad entre las tecnologías ELT, VANTs y cámaras fotográficas. Los datos obtenidos en el levantamiento se procesan para generar los productos deseados (figura 6).

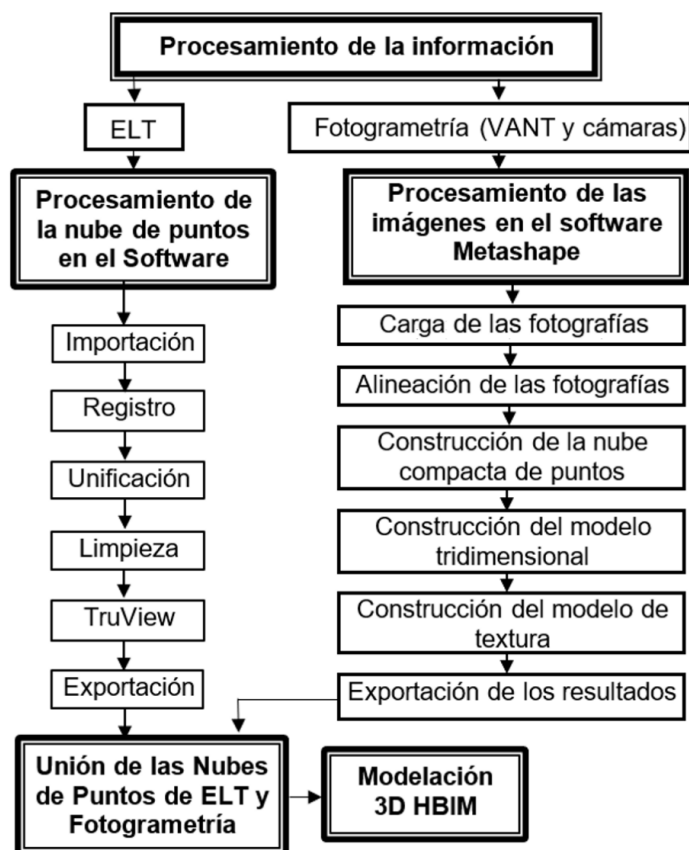


Fig. 6. Esquema de procesamiento de la información. Fuente: elaborada por la autora.

El esquema tecnológico describe el flujo de trabajo necesario para integrar la información, desde la fotogrametría hasta la creación del modelo tridimensional que sirve como base para la modelación HBIM.

- **Procesamiento de las nubes de puntos obtenidas con ELT**

El procesamiento de los datos generados por ELT se realiza con el software *Leica Geosystems Cyclone*, que permite la exploración transversal y resección, recopilación y registro de datos, creación de informes y modelado 3D.

Importación de datos: Los datos obtenidos con ELT se descargan según el tipo de escáner empleado, normalmente a través de USB. Los datos se importan al *software Cyclone*, almacenándose en una base de datos creada para el proyecto con la extensión ".imp".

Registro de la nube de puntos: El registro une todas las estaciones del instrumento mediante métodos manuales o automáticos. En el método manual se seleccionan tres o más puntos comunes entre dos nubes, distribuidos en triángulo o de forma homogénea. El método automático utiliza las dianas levantadas en campo, lo que hace el registro más ágil y preciso.

Unificación de la nube de puntos: Tras registrar las estaciones, las nubes de puntos se integran en un único modelo, eliminando solapes y reduciendo la presencia de elementos duplicados. El proceso optimiza la calidad del resultado tridimensional, disminuye el ruido y mejora la eficiencia en el manejo de los archivos digitales.

Limpieza de la nube de puntos: Se eliminan elementos ajenos o irrelevantes que afectan la zona de trabajo, reduciendo el peso de la nube de puntos y mejorando la precisión del modelo.

Creación de la vista real (*TruView*): Con el *software Publisher*, el *TruView* permite compartir datos de manera sencilla y generar vistas intuitivas en 3D para medición y recorridos virtuales. Esta herramienta ayuda en la geolocalización de los elementos durante la unión de las nubes de puntos.

Exportación de la nube de puntos: La nube de puntos se exporta en formatos compatibles, como ".pts", para su integración con las nubes de puntos de VANTs. Tras registrar los datos con *Cyclone Register 360*, se obtiene un modelo tridimensional que describe las características morfométricas de la FAT con un error medio inferior a 3 mm.

- **Procesamiento de las imágenes obtenidas con VANT y cámaras tradicionales**

El procesamiento de los datos generados por los VANTs y cámaras fotográficas utiliza el *software Agisoft Metashape Professional*, que procesa imágenes digitales de manera fotogramétrica y genera datos espaciales tridimensionales. Los datos

se pueden emplear posteriormente en los SIG para la gestión y manejo de información, así como para la creación de efectos visuales. El procesamiento con cámaras tradicionales sigue el mismo procedimiento que con las imágenes tomadas por los VANTs, aunque en el presente caso se realiza mediante la fotogrametría terrestre.

Los procesos principales incluyen:

Importar imágenes: cargar imágenes de alta calidad en el *software*.

Alinear imágenes: calcular la posición y orientación de cada imagen para alinearlas.

Construir malla: generar una malla tridimensional a partir de las imágenes alineadas.

Texturizar: añadir textura a la malla 3D para crear un modelo realista.

- **Procedimiento para la integración de los datos obtenidos con ELT, VANT y cámaras tradicionales**

La integración de los datos obtenidos con ELT, VANTs y cámaras tradicionales se realiza una vez procesada la información por separado. Para esta tarea, se utiliza el *software Cyclone*, asegurando que los datos estén en el sistema de coordenadas planas rectangulares y se hayan exportado previamente en formatos como “.pts” o “.LAS”.

En primer lugar, se genera el levantamiento tridimensional de nube de puntos con coordenadas mediante la tecnología ELT, utilizando dianas o *targets* (figura 7).



Fig. 7. Vista de dianas empleadas durante el levantamiento con Escáner láser terrestre. Imagen tomada del Proyecto “Que no baje el telón”

Estas dianas se fotografían durante el levantamiento con cámaras tradicionales, lo que facilita el registro al crear puntos comunes en ambas vistas, posibilitando la integración de los datos (figura 8).

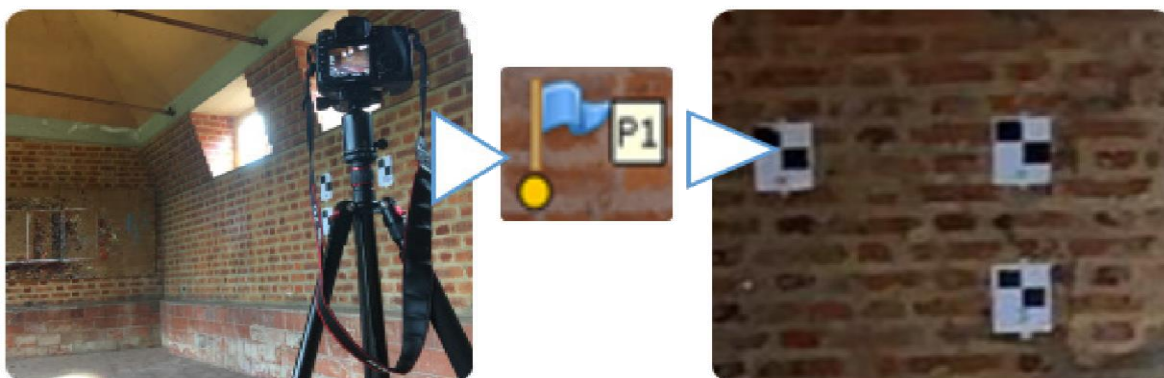


Fig. 8. Vista de *Tarjets* empleados durante el levantamiento con cámaras fotográficas. Fuente: elaborada por la autora a partir de imágenes tomadas del Proyecto “Que no baje el Telón”

Finalmente, se exporta la nube de puntos en formato “.pts”.

- **Modelación HBIM**

La preparación de las configuraciones del proyecto asegura condiciones óptimas para el modelado 3D, evitando interrupciones durante el desarrollo debido a aspectos básicos que pueden establecerse previamente. Aunque el procesamiento detallado en Revit no constituye el enfoque principal del estudio, se señalan las características clave para estructurar una lógica funcional en el modelo.

- **Configuraciones de proyecto**

El trabajo parte de una plantilla existente o diseñada previamente, donde se establece la ubicación del archivo de proyecto y se ajustan niveles y rejillas necesarios. En el caso que se analiza, la plantilla ya incluía niveles y rejillas, que solo se modificaron en su posición.

- **Modelación tridimensional**

La nube de puntos se importa al *software* para realizar el modelado 3D, permitiendo un análisis exhaustivo de los detalles arquitectónicos y estructurales mediante navegación 3D, recorridos virtuales y el uso de *TruView*.

Creación de componentes propios: la estructuración de elementos en Revit se basa en familias, cuyas modificaciones impactan de forma automática en todo el

proyecto. En los modelos HBIM, es frecuente la creación de bibliotecas debido a la ausencia de elementos preconfigurados adecuados a cada caso.

Modelación de elementos arquitectónicos y estructurales: el proceso de modelación incluye la adición de componentes como muros, pilares, suelos, cubiertas, escaleras, barandillas y elementos hospedados como puertas y ventanas. La representación de los componentes se ajusta a las características específicas del proyecto y su integración permite un diseño coherente. Algunos ejemplos de creación de elementos arquitectónicos y estructurales se representan en las figuras siguientes:

Adición de muros (figura 9).

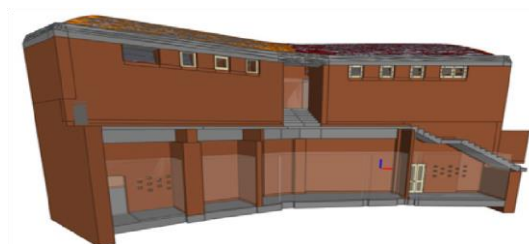


Fig. 9. Creación de muros. Fuente: elaborada por la autora.

Adición de Pilares

Se pueden añadir pilares en la vista de plano. La altura del pilar se define en las propiedades del componente. Las propiedades permiten definir el nivel de base y el nivel superior (figura 10).

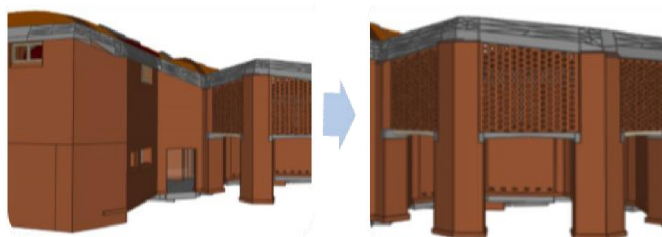


Fig. 10. Creación de pilares arquitectónicos y estructurales. Fuente: elaborada por la autora.

Adición de suelos y cubiertas (figura 11) y escaleras y barandillas (figura 12).



Fig. 11. Adición de suelos y cubiertas. Fuente: elaborada por la autora.



Fig. 12. Creación de escaleras y barandillas. Fuente: elaborada por la autora.

Adición de componentes hospedados.

En las imágenes se representan la adición de componentes hospedados, como puertas y ventanas, realizados de forma similar a los procesos anteriores (figura 13).



Fig. 13. Adición de puertas y ventanas. Fuente: elaborada por la autora.

Anotaciones y detalles: para complementar el modelo 3D, se añaden textos, detalles gráficos y cálculos de área, volumen, y tablas de planificación. Estas adiciones son opcionales y dependen de los objetivos específicos del proyecto.

2.3.2 Deterioro esperado en el inmueble (b2)

Como resultado de la etapa de exploración de la instalación y el análisis de las condiciones ambientales, se identifican los deterioros presentes en el inmueble y las variables ambientales que los favorecen. Posteriormente, se selecciona el equipamiento y, con apoyo de las imágenes satelitales disponibles y cartográficas de la zona, se define preliminarmente la ubicación y distribución de las estaciones de monitoreo de las variables ambientales. Además, se realiza el muestreo de puntos empleando herramientas de los SIG, teniendo en cuenta los niveles y características de la instalación y su entorno.

En el caso de la humedad relativa y la temperatura, se calculan los valores promedio durante un día soleado, mediante mediciones realizadas desde el amanecer hasta el ocaso. Los valores representan las variaciones diarias en el área de estudio. Respecto al viento, se identifican las paredes y muros que,

debido a su orientación, ofrecen mayor resistencia a la dirección de los vientos predominantes a lo largo del año. Para la exposición a la radiación solar, se calcula en los cuatro momentos del año donde se producen mayores variaciones, correspondientes a los dos solsticios (verano e invierno) y los dos equinoccios (primavera y otoño) (anexo 2).

▪ **Representación de las variables ambientales en el SIG**

Una de las etapas más complejas consiste en la representación y modelación de las variables ambientales seleccionadas (Tabla 1). A continuación, se resume cómo se obtiene cada variable en el SIG, tras las mediciones iniciales en el área de estudio o a partir de los insumos cartográficos.

Tabla 1: Influencia de las variables según la posición y nivel.

Nombre de la variable	Procedimiento para su construcción	Descripción	Tipo de infraestructura
Humedad relativa	Interpolación espacial (método de "kriging") a partir de mediciones puntuales	Representación de las variaciones de la humedad relativa en el área de estudio	Niveles 1 y 2 Paredes (interiores y exteriores)
Temperatura	Interpolación espacial (método de "kriging") a partir de mediciones puntuales	Representación de las variaciones de la temperatura en el área de estudio	Niveles 1 y 2 Paredes (interiores y exteriores)
Exposición a la radiación solar	Herramientas de modelación de la radiación solar en horas	Representación de las horas de sol y sombra que reciben las paredes y muros de la instalación para cuatro momentos del año (solsticios y equinoccios)	Niveles 1 y 2 Paredes (interiores y exteriores)
Exposición al viento	Herramientas de análisis espacial en mapas vectoriales (cálculo de la orientación de vectores) y operaciones con los atributos de la base de datos	Representación de las paredes y muros más expuestos según su orientación y la dirección predominante de los vientos.	Niveles 1 y 2 Paredes (interiores y exteriores)
Cercanía del manto freático	Herramientas de superposición espacial entre los mapas	Cercanía de la superficie al manto freático	Niveles 1 Paredes (interiores y exteriores)

Fuente: elaborada por la autora.

Una vez obtenidos los mapas temáticos de cada variable, se representa el deterioro potencial o esperado considerando las condiciones favorables que inciden en su manifestación. Para ello, se extraen los valores de las variables ambientales en cada muro o pared de la instalación y se procede al diseño y elaboración del modelo matemático.

El uso de herramientas de análisis espacial en los SIG, como la superposición de capas (muros y paredes) con los mapas temáticos de humedad relativa, temperatura, exposición a la radiación solar, dirección de los vientos predominantes y cercanía al manto freático, permite obtener los valores mínimos, máximos y promedios de cada variable en las paredes y muros de la instalación. Los valores se emplean en el cálculo del deterioro potencial mediante el modelo matemático diseñado.

De acuerdo con las características de la instalación y las variables ambientales, la aplicación del modelo matemático depende del nivel en el que se realiza el análisis (primera planta o segunda planta) y de la exposición de los elementos (interiores o exteriores).

2.3.3 Modelo matemático para la representación de las condiciones favorables de deterioro en paredes y muros

Se desarrolla un modelo matemático con el objetivo de identificar las condiciones que favorecen la aparición de deterioros en las paredes y muros del inmueble. El modelo se plantea como una herramienta accesible, económica y fácil de aplicar, estructurado en dos etapas: a) La confección de la matriz causa-efecto con los factores ambientales y deterioros. b) El cálculo de las condiciones favorables para la manifestación de los diferentes tipos de deterioros.

A continuación, se describe cada etapa:

- **Confección de la matriz causa-efecto con los factores ambientales y deterioros**

La matriz de relaciones causa-efecto organiza en columnas los tipos de deterioros presentes en los muros de ladrillos, mientras que las filas corresponden a los factores ambientales medidos en el lugar de estudio.

El recorrido por el área de investigación, acompañado por expertos, permite identificar los deterioros existentes y realizar un listado exhaustivo de los factores ambientales que los generan. El análisis previo da lugar a la construcción de la matriz causa-efecto.

Las evaluaciones cualitativas realizadas por los expertos, quienes cuentan con experiencia práctica en la identificación de factores y deterioros en construcciones

de ladrillo, juegan un papel fundamental. La valoración inicial del impacto de los factores ambientales sobre los deterioros se expresa en una escala ordinal que incluye los niveles bajo, leve, medio, alto y muy alto.

A partir de la consulta a expertos y bibliografía especializada (Patiño, 2012; Franceschi & Germani, 2021, 2024; Broto, 2006), se realiza la valoración cualitativa de la influencia de los factores ambientales en los deterioros observados (tabla 2).

Tabla 2. Valoración cualitativa simple de la influencia de los factores ambientales sobre los deterioros a partir del criterio de los expertos.

Factores Ambientales	Ataque Biológico	Alteración Cromática	Pérdida de Material	Depósito Superficial	Desprend.
Humedad	Muy Alto	Alto	Medio	Leve	Medio
Temperatura	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Medio
Acción Eólica	Leve	Bajo	Medio	Leve	Medio
Exposición Solar	Alto	Alto	Leve	Alto	Leve
Cercanía al Manto Freático	Muy Alto	Alto	Medio	Leve	Medio

Fuente: elaborada por la autora.

- **El cálculo de las condiciones favorables para la manifestación de los deterioros en las paredes y muros**

Requiere la transformación monótona de la escala de medición ordinal, con el objetivo de obtener una expresión numérica que refleje la importancia de la influencia de los factores ambientales presentes en el sitio de análisis. Según la relación entre el factor ambiental y el tipo de deterioro, se aplican diferentes funciones matemáticas (figuras 14 y 15), considerando que algunos factores ambientales tienen un impacto creciente en los deterioros, mientras que otros presentan un impacto decreciente (tabla 3).

Tabla 3. Sentido de la relación entre factores ambientales y las condiciones para la aparición de los deterioros según los expertos.

Factores Ambientales	Ataque Biológico	Alteración Cromática	Pérdida de Material	Depósito Superficial	Desprend.
Humedad	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente

Temperatura	Decreciente	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente
Acción Eólica	Decreciente	Decreciente	Creciente	Decreciente	Creciente
Solar	Decreciente	Creciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
Cercanía al Manto Freático	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente

Fuente: elaborada por la autora.

Por ejemplo, el incremento de la temperatura reduce las condiciones propicias para la aparición de la pátina biológica en las paredes y muros, pero simultáneamente genera pérdidas de material en los ladrillos debido a los procesos de dilatación y contracción que experimenta la arcilla ante los cambios de temperatura.

- **Funciones matemáticas utilizadas para cada factor ambiental por tipo de deterioro**

Valor Cualitativo	Valor Cuantitativo
Bajo	0.05
Leve	0.15
Medio	0.3
Alto	0.45
Muy alto	0.6

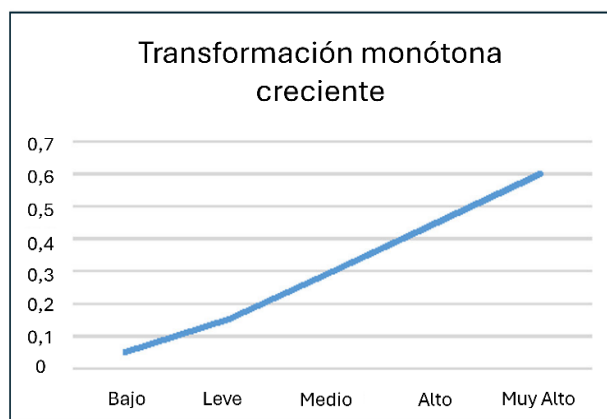


Fig. 14. Transformaciones monótonas de la escala ordinal para encontrar una expresión numérica de la importancia de los impactos. Fuente: elaborada por la autora.

Valor Cualitativo	Valor Cuantitativo
Bajo	0.6
Leve	0.45
Medio	0.3
Alto	0.15
Muy alto	0.05

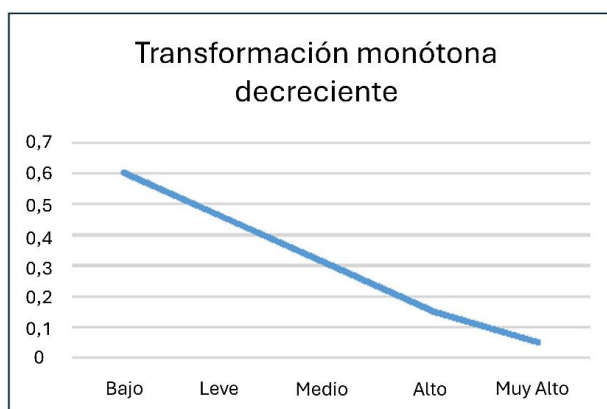


Fig. 15. Transformaciones monótonas decreciente de la escala ordinal para encontrar una expresión numérica de la importancia de los impactos. Fuente: elaborada por la autora.

- **Mediciones de las variables ambientales**

Como se expone en el epígrafe anterior, el análisis espacial realizado en el SIG permite extraer los valores correspondientes a los factores ambientales para cada muro o pared de la instalación. Los valores se clasifican en cinco intervalos utilizando el método de natural break o Jenks y luego se transforman en una escala ordinal para su utilización en etapas posteriores.

Las condiciones favorables (CF) para la manifestación de cada tipo de deterioro dependen de las variaciones de los factores ambientales presentes en el lugar, así como de la importancia asignada a cada factor por los expertos. Esta relación se representa en la tabla 4 y se calcula mediante la fórmula 1.

(Fórmula 1)

$$\text{Condiciones favorables} = \text{Importancia a priori} \times \text{Importancia de la medición}$$

Dónde:

Importancia a priori: es la otorgada por los expertos para ese factor ambiental para el deterioro en cuestión (representado en la escala ordinal).

Importancia de la medición: es el valor del factor ambiental en ese muro, extraído del análisis espacial en el SIG y representado en la escala ordinal.

En la tabla 4 se describe la matriz de relación causa-efecto. Cada elemento toma en cuenta la valoración cualitativa de la importancia a priori del factor ambiental y el sentido de la correlación de la medición.

Tabla 4. Descripción de la matriz de relación causa- efecto.

Factores Ambientales	Ataque Biológico	Alteración Cromática	Pérdida de Material	Depósito Superficial	Desprend.
Humedad	Muy Alto Creciente	Alto Creciente	Medio Creciente	Leve Creciente	Medio Creciente
Temperatura	Medio Decreciente	Bajo Creciente	Medio Creciente	Bajo Creciente	Medio Creciente
Acción Eólica	Leve Decreciente	Bajo Decreciente	Medio Creciente	Leve Decreciente	Medio Creciente
Exposición Solar	Alto Decreciente	Alto Creciente	Leve Decreciente	Alto Decreciente	Leve Decreciente
Cercanía al Manto Freático	Muy Alto Creciente	Alto Creciente	Medio Creciente	Leve Creciente	Medio Creciente

Fuente: elaborada por la autora.

En la Tabla 5, se representa la matriz de impactos de las mediciones de los factores ambientales de un ejemplo de un muro de ladrillo.

Tabla 5. Matriz de incidencia de las mediciones de los factores ambientales

Factores ambientales	Pátina Biológica	Alteración cromática	Pérdida de material	Depósitos Superficiales	Desprend.	Total
Humedad Alta	0,27	0,2	0,14	0,07	0,14	0,81
Temperatura Media	0,09	0,02	0,09	0,02	0,09	0,3
Acción Eólica Leve	0,07	0,02	0,05	0,07	0,05	0,25
Exposición Solar baja	0,27	0,27	0,09	0,27	0,09	0,99
Cercanía al Manto Freático muy alta	0,36	0,27	0,18	0,09	0,18	1,08
Total	1,06	0,78	0,54	0,51	0,54	

Fuente: elaborada por la autora.

El análisis de la tabla por filas permite identificar el factor ambiental con mayor influencia en cada muro. La proximidad al manto freático, la exposición a la radiación solar y la humedad representan las variables con mayor incidencia en la manifestación de deterioros, afectando directamente la estabilidad y conservación de las estructuras.

El análisis por columnas, por su parte, determina el deterioro con mayor probabilidad de manifestación en la pared de ladrillo estudiada.

Los resultados se vinculan con la representación espacial de cada pared y muro para elaborar los mapas que describen la manifestación de cada tipo de deterioro en el área de estudio. Dichos mapas se utilizan en etapas posteriores del modelo propuesto.

Hasta aquí, los resultados permiten una primera aproximación a las zonas con mayor potencial para la aparición de deterioros, considerando las condiciones de manifestación en paredes y muros influenciadas por variables ambientales y los diferentes tipos de deterioros. Sin embargo, el análisis se complementa con la información adicional obtenida, lo que hace necesario establecer un vínculo entre

los SIG y el modelado HBIM, además de desarrollar una aplicación para su visualización y gestión.

2.4 Modelo de información de la edificación y SIG con información del deterioro en cada pared y muro (C)

Una vez construida la representación cartográfica del inmueble en el HBIM a través de los escáneres láser, los vehículos aéreos no tripulados y las cámaras fotográficas, con toda la información referente a la edificación y por otra parte generados los deterioros esperados resultados de la aplicación del modelo matemático que considera la influencia de los factores ambientales definidas por los expertos, la siguiente etapa consiste en vincular ambos resultados.

▪ Vinculación de los modelos HBIM-SIG

La utilización conjunta de la metodología HBIM y los SIG constituye dos fuentes de datos que la mayoría de los gestores de infraestructuras buscan combinar por todas las ventajas y aplicaciones que tienen (Marino et al., 2020).

La construcción de un SIG parte de la consolidación de datos espaciales en múltiples formatos (*Shapefiles*, *GeoTIFF*, *KML*, *CSV*, entre otros), integrándolos en una base de datos compatible con aplicaciones en la nube. Para gestionar esta información y aprovechar las ventajas de un entorno colaborativo, se utiliza GeoNode, una herramienta que combina funcionalidades avanzadas de tecnologías como *GeoServer*, *GeoNetwork* y *PostgreSQL/PostGIS*. Estas tecnologías permiten no solo el almacenamiento y distribución de datos mediante estándares OGC como WMS y WFS, sino también la visualización eficiente y accesible de los mismos.

GeoNode, desarrollado sobre el *framework Django*, destaca por su alto nivel de personalización y su enfoque en la seguridad del manejo de datos. Su integración con herramientas como *GeoDjango* y su *REST API* extensible facilita la interoperabilidad con aplicaciones externas, proporcionando datos en formato *JSON*. Esta capacidad es clave para plataformas móviles y web que interactúan directamente con los datos geográficos almacenados.

En el proyecto se extiende la funcionalidad de *GeoNode* mediante una aplicación web diseñada para manejar datos IFC (*Industry Foundation Classes*), los cuales

contienen información geométrica y de propiedades asociadas a edificaciones. Esta herramienta permite gestionar colecciones de modelos, edificios y otros elementos mediante formularios especializados. Además, incorpora videos capturados por drones, que complementan el análisis visual y espacial de las construcciones (figura 16).

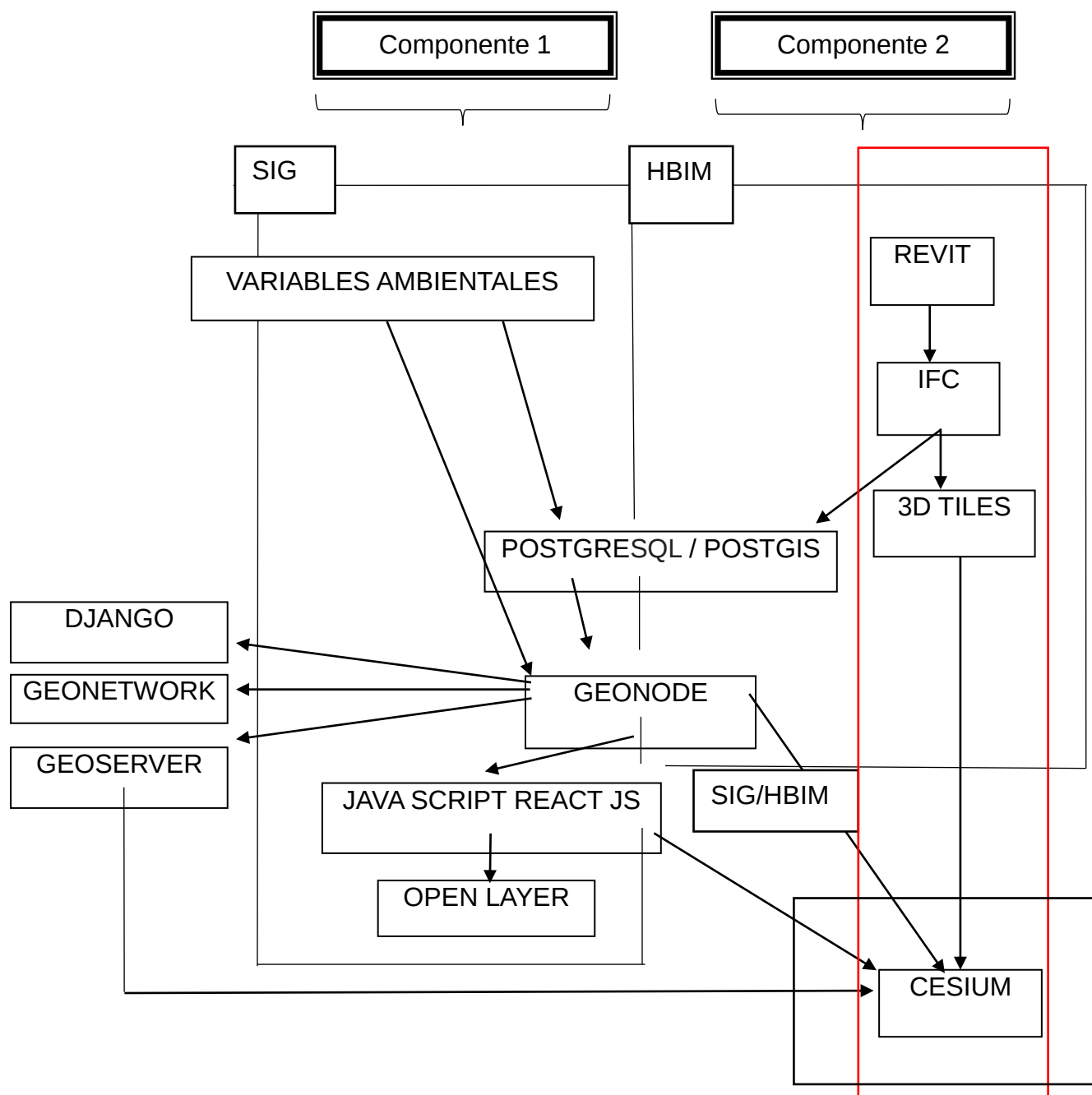


Fig. 16. Algoritmo para realizar el vínculo de los elementos HBIM- SIG. Fuente: elaborada por la autora.

La vinculación entre el SIG y el modelo HBIM, eje central del proyecto, se desarrolla en dos componentes principales. El primero conecta los datos espaciales y los mapas de deterioro generados a partir del modelo matemático que considera variables ambientales. El segundo integra los datos del modelo HBIM, incluidos detalles geométricos y no geométricos de los elementos de las edificaciones. Esta integración asegura que las representaciones tridimensionales (3D) y los mapas de deterioro estén vinculados a nivel de cada pared y muro.

En esta etapa, es fundamental la visualización de los resultados. Los datos son representados mediante las capacidades de Cesium, una potente plataforma que permite explorar modelos 3D y mapas interactivos de manera fluida y precisa. Paralelamente, la utilización de *OpenLayer* en la visualización 2D ofrece herramientas avanzadas para consultas directas sobre los datos almacenados, maximizando la experiencia del usuario a través de una interfaz web intuitiva.

El esquema representa las relaciones entre diversos elementos clave en el análisis del estado de las edificaciones. Estas relaciones incluyen tanto conexiones uno a uno como uno a muchos entre los síntomas observados, los deterioros estructurales, los tipos de material, las condiciones ambientales, los tipos de elementos IFC, las propuestas de solución y las probabilidades asociadas. Específicamente, establece vínculos que permiten comprender cómo las condiciones ambientales o los materiales utilizados influyen en la aparición de síntomas y deterioros, así como las probabilidades de que ocurran estas condiciones o síntomas. Además, el esquema proporciona una base para determinar soluciones aplicables, conectando cada elemento afectado con propuestas específicas que optimicen la gestión y recuperación de la infraestructura (figura 17).

El modelo desarrollado presenta un alto grado de generalización y aplicabilidad a diversos casos de estudio, siempre que se incorpore una base de datos con información sobre el tipo de material, las condiciones específicas y otros factores relevantes al contexto del análisis. La estructura del esquema facilita la organización de los datos y la definición de relaciones necesarias para generar análisis precisos y soluciones efectivas dentro del modelo HBIM-SIG.

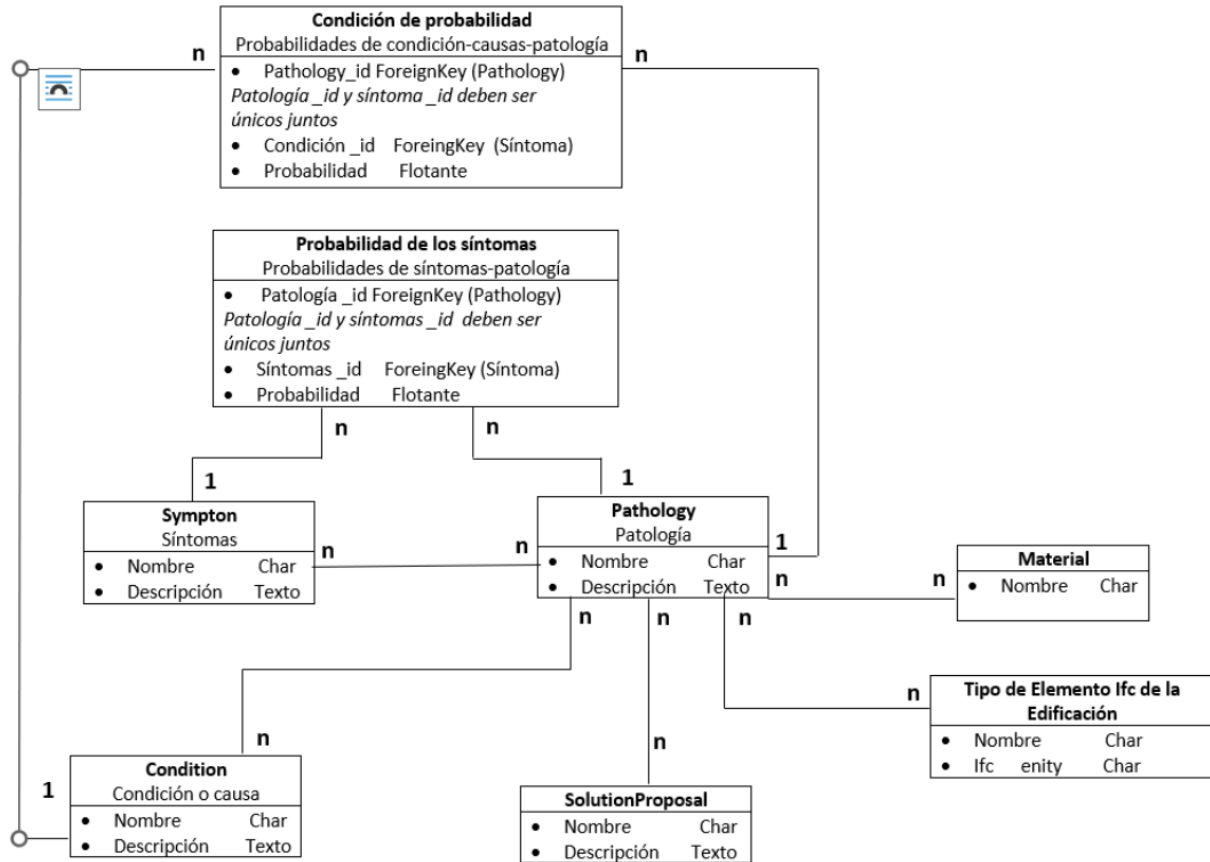


Fig. 17. Relaciones de dependencias HBIM-SIG. Fuente: elaborada por la autora.

La integración de estas metodologías permite digitalizar deterioros adicionales directamente sobre las fotografías de cada pared y muro, lo que no solo mejora los resultados iniciales del modelo matemático, sino que también refina el diagnóstico estructural. El enfoque combina datos procedentes de diferentes fuentes para ofrecer una representación más completa y precisa del estado de las edificaciones.

A través del análisis experto de los datos vinculados, el sistema proporciona cálculos detallados de superficies y volúmenes de áreas deterioradas. La conexión entre SIG y HBIM mejora así la evaluación y gestión de infraestructuras, ofreciendo un modelo práctico y replicable que puede ser aplicado en otros contextos.

El modelo no solo optimiza los procesos geoespaciales, sino que también fomenta la colaboración interdisciplinaria, combinando herramientas modernas y metodologías especializadas en una plataforma eficiente y accesible.

2.4.1 Diagnóstico del PA

Como resultado del vínculo anterior entre HBIM y SIG fue posible mejorar los resultados obtenidos del modelo matemático y contar con un diagnóstico más preciso de los deterioros encontrados en el inmueble, lo que facilitó obtener otros resultados.

- **Mapas de prioridad de intervención y de gravedad del deterioro**

En esta etapa se elaboran dos mapas que sintetizan los resultados de los deterioros obtenidos en el apartado anterior. Para su elaboración se aplican las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) en los SIG. En esta fase la metodología utilizada parte del esquema planteado en (Barredo y Gómez, 2005) y (Gigović et al., 2016) que identifican ocho etapas para el empleo de las técnicas de EMC en los SIG (anexo 3).

El primero de los mapas representa la gravedad del deterioro según la manifestación de los deterioros estudiados. En la elaboración del resultado se asignaron pesos a los tipos de deterioro según la gravedad atendiendo al criterio de los expertos consultados.

El segundo es un mapa de intervención basado en la prioridad para la erradicación de los deterioros, como resultado, se identifican las paredes y muros por donde se debe empezar las labores teniendo en cuenta la manifestación de los deterioros estudiados y cuyas acciones para su eliminación son más simples.

- **Definición del problema en la aplicación de la metodología**

La definición del problema en la aplicación de la metodología descrita en el anexo 3 se encuentra en la dificultad para determinar el punto de partida en las labores de restauración de la instalación, debido a la variedad y distribución de los deterioros manifestados. Esta incertidumbre afecta la eficiencia en la gestión y conservación de los inmuebles. La elaboración de mapas que representen la gravedad del deterioro y establezcan prioridades de intervención contribuye a optimizar el proceso, facilitando la toma de decisiones fundamentadas en criterios técnicos y espaciales.

- **Selección de las variables o criterios**

En esta etapa se determinan cuáles son los criterios o variables que son útiles para construir el mapa de prioridades. Los criterios son aspectos de la realidad que inciden de alguna manera en las ventajas o inconvenientes de las alternativas disponibles como soluciones.

Como criterios de análisis, se consideran los distintos mapas de deterioro, mientras que las áreas de la instalación que no corresponden a paredes o muros se establecen como restricciones. La delimitación permite una evaluación más precisa del estado de conservación, optimizando la interpretación de los datos y la planificación de intervenciones.

- **Selección de la técnica o método de EMC**

Las técnicas de EMC se agrupan en: No compensatorias, compensatorias y borrosas (Buzai, 2013). En dependencia de con cual se trabaje se tendrá un nivel de riesgo mayor o menor. A partir de las características de las variables utilizadas (mapas de deterioro) y su representación de manera continua en el SIG se emplea la técnica de fuzzy. Esta técnica es una de las de más reciente incorporación a los SIG y está incorporada en las herramientas de análisis espacial de estas tecnologías. A su vez forma parte de las técnicas compensatorias aditivas, el grado de prioridad se determina multiplicando el valor estandarizado de cada criterio por su peso (fórmula 2).

$$\sum_{j=1}^n w_j v_{ij}$$

(Fórmula 2)

w_j – es el peso ponderado del criterio j

v_{ij} – es el valor asignado de la alternativa i en el criterio j

Para cada una de las variables el programa multiplica el valor de cada píxel (de 1 a 100), por el peso ponderado que fue asignado a esta capa ráster. Como resultado se obtiene un mapa que representa la prioridad en la intervención teniendo en cuenta la gravedad de los deterioros que se manifiestan en la instalación.

- **Preparación y modelación de los criterios**

La fase de preparación y modelación constituye una de las etapas más laboriosas en una EMC (Remond et al., 2018). Sin embargo, dado que los criterios se basan en los mapas de deterioro, fue necesario emplear funciones de pertinencia borrosa, específicamente de tipo lineal ascendente, para estandarizar los datos en una misma escala. El procedimiento garantiza la uniformidad en la evaluación de los deterioros y optimiza la interpretación de los resultados.

- **Asignación de los pesos para la matriz EMC**

En esta etapa de la EMC (anexo 3), se les asignan los pesos a los factores de acuerdo con el grado de influencia mutua. En la investigación fue utilizado el método de Saaty también conocido como de Jerarquías Analíticas o Comparación por Pares, muy utilizado en estos estudios (Olaya, 2014). Para comprobar la validez del método es necesario que el cálculo del valor de consistencia de juicio sea menor de 0.10 (Buzai, 2013).

Los datos fueron procesados en una matriz en Excel automatizada que puede ser apreciada en el anexo 4. El ejercicio de comparación por pares fue realizado por un total de nueve expertos de manera individual (anexo 5) listado de expertos consultados. Finalmente se tomó el valor que más se repitió (la moda) siempre y cuando el índice de consistencia de juicio estuviera por debajo de 0,1.

- **Estandarización de los criterios**

El análisis multicriterio requiere que los valores contenidos en los diversos mapas sean transformados en unidades comparables. La operación a utilizar en el SIG depende del tipo de técnica seleccionada para llevar a cabo la evaluación (Olaya, 2014). En el caso de las técnicas basadas en la lógica de *fuzzy*, se logra a partir del empleo de funciones de pertinencia borrosa de tipo lineal (A. Ramírez, 2014).

- **Obtención de las EMC y validación de los resultados**

Los resultados generados en la etapa de aplicación del SIG de la EMC permitieron obtener un mapa de prioridad de intervención que permite identificar un orden lógico de acuerdo con la gravedad y manifestación de los deterioros en el área de estudio.

Los resultados hasta aquí garantizan la representación de las zonas en donde se debe comenzar las labores de restauración teniendo en cuenta la gravedad y prioridad de intervención.

2.5 Inventario de signos de deterioro de la infraestructura por métodos tradicionales (D)

En esta etapa se recopila información sobre las manifestaciones de los diferentes deterioros en las paredes y muros del inmueble por métodos tradicionales, a partir de recorridos por la instalación de los expertos auspiciado por el proyecto “Que no baje el telón” (Merlo y Feliciano Valenciaga, 2023) para su posterior empleo en la comprobación del modelo propuesto. Como parte del inventario realizado se cuantifican dónde se encontraron los diferentes tipos de deterioro en los bloques (edificios), paredes y muros de la instalación, los resultados del inventario exhaustivo se muestran en el anexo 6.

2.6 Validación del modelo propuesto (E)

En esta última fase, se valida el modelo propuesto mediante la comparación de los signos de deterioro inventariados por métodos tradicionales con los resultados obtenidos a partir de los mapas de deterioro generados por la vinculación HBIM-SIG. La validación se llevó a cabo en cuatro escenarios posibles: Nivel 1 (paredes exteriores), Nivel 1 (paredes interiores), Nivel 2 (paredes exteriores) y Nivel 2 (paredes interiores). Para el análisis, se utilizó el índice de Kappa (De Ullibarri Galparsoro & Pita Fernández, 1999), una medida estadística que evalúa el grado de concordancia entre dos métodos, ajustando el efecto del azar.

La fórmula del índice de Kappa es la siguiente:

$$k = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (\text{Fórmula 3})$$

Donde:

P_o es la proporción de acuerdo observado entre los métodos.

P_e es la proporción de acuerdo esperada por azar.

Para calcular el índice, fue necesario convertir previamente los valores de los mapas de deterioro en variables binarias. Se consideraron como zonas con mayores condiciones de deterioro aquellas cuyos valores estaban por encima de

la media. El primer resultado fue refinado mediante la interpretación de las fotografías de las paredes y muros, obtenidas a través de la integración HBIM-SIG. La validación del modelo mediante el índice de Kappa permitió comprobar la fiabilidad de los resultados obtenidos en el diagnóstico, destacando la efectividad de la integración HBIM-SIG. Además, el proceso permitió identificar las limitaciones del modelo propuesto, proporcionando una base sólida para futuras mejoras.

2.7 Conclusiones parciales capítulo 2

El capítulo 2 establece las bases metodológicas y tecnológicas para la integración de HBIM y SIG en el diagnóstico del PA. Se demuestra cómo los procesos de representación cartográfica y modelación contribuyen a una documentación precisa y actualizada de las condiciones de deterioro, fundamentando la importancia de integrar datos tridimensionales con análisis espaciales avanzados. Esta vinculación optimiza tanto el diagnóstico como la gestión patrimonial, permitiendo una planificación más eficaz de intervenciones de conservación.

La integración entre HBIM y SIG se apoya en diversos métodos, cada uno con aplicaciones específicas y adaptables. Los cuales incluyen la interoperabilidad mediante formatos estándar, como *IFC* y *CityGML*, que facilita la transferencia de datos entre plataformas; la integración directa mediante *software* especializado, como *ArcGIS Pro*, que permite analizar y visualizar modelos BIM en entornos SIG; y las plataformas híbridas, que centralizan funciones en sistemas como *Digital Twins*. además, se destacan los métodos de exportación e importación de datos, que garantizan la compatibilidad entre herramientas mediante formatos como *shapefiles* o *GeoJSON*; la vinculación basada en bases de datos, que centraliza la información para su análisis conjunto; y el desarrollo de aplicaciones personalizadas, diseñadas para optimizar la interacción entre modelos tridimensionales y análisis espaciales.

En esta investigación, la vinculación HBIM-SIG se fundamenta principalmente en el desarrollo de aplicaciones personalizadas, lo que permite un flujo programado entre los datos tridimensionales y su análisis en plataformas SIG. El enfoque se complementa con la exportación e importación de datos mediante formatos

estándar, asegurando la compatibilidad y transferencia entre herramientas. También se emplea la vinculación basada en bases de datos, que centraliza la información recopilada y facilita su uso para la gestión integral del PA. Estas estrategias fortalecen el proceso metodológico y garantizan una alta precisión en la documentación, optimizando la gestión de recursos y acciones de conservación. Mediante la implementación de una aplicación web que vincula mapas de deterioro con representaciones en 3D, se facilita significativamente la planificación de intervenciones. Esta herramienta permite una documentación centralizada y actualizada, mejorando la eficiencia en la priorización de áreas críticas para el mantenimiento del PA. Adicionalmente, la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio ha sido esencial para generar mapas de prioridad que integran variables ambientales y características del deterioro, ofreciendo un enfoque estructurado y efectivo para la conservación patrimonial.

El capítulo también consolida las bases para un marco metodológico sólido y replicable. La validación del modelo HBIM-SIG mediante el índice de Kappa confirma su precisión y consistencia, posicionándolo como una herramienta avanzada para aplicaciones futuras en el diagnóstico y conservación del PA. El enfoque destaca por su flexibilidad y capacidad de adaptarse a distintos entornos y condiciones, ampliando su aplicabilidad más allá del caso de estudio.

CAPÍTULO 3

**VALIDACIÓN DEL MODELO (HBIM-SIG), EN EL
DIAGNÓSTICO PATOLÓGICO DE LA UNIVERSIDAD
DE LAS ARTES**

CAPÍTULO 3. VALIDACIÓN DEL MODELO (HBIM-SIG), EN EL DIAGNÓSTICO PATOLÓGICO DE LA UNIVERSIDAD DE LAS ARTES.

En esta etapa se describen los resultados principales a partir del modelo propuesto.

3.1 Caso de estudio

Las Escuelas de Arte de Cubanacán, hoy conocidas como Universidad de las Artes (ISA), son una obra arquitectónica emblemática, concebida en los primeros años de la Revolución Cubana. Surgieron en 1961, cuando Fidel Castro y Ernesto Che Guevara decidieron transformar el exclusivo campo de golf Country Club de La Habana en una escuela de arte única. Encargaron el diseño al arquitecto cubano Ricardo Porro, quien sumó a los italianos Vittorio Garatti y Roberto Gottardi al proyecto. Juntos, lograron una integración entre naturaleza y arquitectura, diseñando las escuelas de manera que respetaran el entorno del antiguo campo de golf. La obra incluyó la escuela de Danza Moderna, situada en un punto elevado, la de Ballet en una garganta profunda y otras edificaciones adaptadas a la orografía del lugar.

Un elemento distintivo del diseño fue el uso de materiales locales, como ladrillos y tejas de barro, impulsado por la escasez de recursos debido al bloqueo económico de Estados Unidos. La bóveda catalana se convirtió en el sistema estructural predominante, dotando al conjunto de una identidad única. El enfoque no solo permitió sortear las limitaciones materiales, sino que también añadió una riqueza expresiva a las estructuras. Inauguradas oficialmente en 1965, las escuelas se convirtieron en espacios destacados para la formación en danza, ballet, música, teatro y artes plásticas. A pesar de las inundaciones, el vandalismo y las dificultades económicas, el ISA ha mantenido su labor educativa, formando artistas reconocidos internacionalmente.

Sin embargo, los años han provocado un deterioro significativo al conjunto arquitectónico. En 1997, las escuelas fueron declaradas zona de protección por la Comisión Nacional de Monumentos, y se inició un proceso de restauración en 1999, con el apoyo del Estado Cubano. Aunque las labores de rehabilitación avanzaron durante más de una década, la crisis económica internacional limitó el

presupuesto y detuvo las obras en 2011. El deterioro continuó, especialmente en la escuela de Teatro, donde los trabajos de restauración apenas comenzaron en 2008 para detenerse poco después.

Recientemente, en 2015, bajo el proyecto “Que no baje el Telón” impulsado por la Embajada de Italia en Cuba, se retomaron los esfuerzos de restauración. El proyecto incluyó investigaciones, capacitaciones y el uso de tecnologías geográficas para preservar la imagen arquitectónica y restituir la funcionalidad del conjunto. La Empresa de Proyectos ATRIO y el Ministerio de Cultura han actualizado los planes de restauración para adaptarlos a las necesidades actuales, buscando mantener vivo el símbolo cultural y arquitectónico de la nación cubana (Paradiso, 2016).

3.2 Descripción general y estado actual

La zona específica de estudio la cual forma parte del conjunto, de elevado valor patrimonial, de las cinco Escuelas de Arte del ISA es la Facultad de Arte Teatral FAT que ocupa un área aproximada de 57000 m², la misma se caracteriza por un terreno con una morfología irregular.

La Escuela de Arte Dramático se encuentra al este de la Escuela de Danza Moderna, en una ligera colina que desciende en un recodo del río Quibú, la zona verde que rodea la FAT se caracteriza por una altimetría variable, con mucha vegetación y árboles altos. El nivel de las cubiertas es variable y debido a la morfología del terreno, algunos “bloques” tienen uno o dos niveles. De haberse completado, esta escuela y la Escuela de Música habrían sido las más grandes del complejo. El programa original de la Escuela de Arte Dramático era extenso, complicado y sin claros precedentes. La escuela contenía tanto un gran teatro interior como un anfiteatro más pequeño con un escenario compartido. Varios tipos de aulas, estudios e instalaciones administrativas conformaban el resto del programa, que también incluía una cafetería y una biblioteca (Merlo y Feliciano Valenciaga, 2023).

El complejo debía estar compuesto por tres conjuntos, cada uno de ellos organizado en torno a patios abiertos y conectados entre sí por las terrazas ajardinadas que descienden hacia el río. La Escuela de Arte Dramático da la

espalda al paisaje y mira hacia dentro, a un entorno interiorizado que es evocador de un entorno urbano norte africano o mediterráneo. La armonía de sus formas y materiales es una construcción orgánica unificada que proporciona continuidad arquitectónica a pesar de los elementos que faltan.

La facultad se divide en 14 edificios (en adelante denominados bloques) que permiten representar con el grado de detalle necesario los fenómenos de degradación e inestabilidad relativos a los materiales y las estructuras. Doce de ellos se distribuyen entorno a recorridos abiertos como parte de un único organismo, mientras que los dos restantes se sitúan en una posición descentrada. Cada bloque tiene su propia entrada; a veces, hay un segundo ingreso en una o más fachadas exteriores.

Debido a la adaptación del conjunto al terreno los diferentes objetos se desarrollan en diferentes cotas de altura, algunos (bloques 4, 5, 6, 10 y 11) con dos niveles interiores. En general la edificación está erigida a base de muros de carga contruidos con ladrillos de barro terminados a caravista que soportan las diversas bóvedas catalanas, característica del conjunto arquitectónico.

La estructura está conformada por muros de carga y bóvedas con materiales de fabricación artesanal (losas de barro para piso, rodapiés, losas de barro para las cubiertas, ladrillos de barro) unidos por las técnicas empleadas (cubiertas de bóvedas tabicadas o catalanas de losas de barro y ladrillos ahuecados, muros de ladrillos colocados a cara vista) de variada calidad en la materia prima y en la propia elaboración y ejecución en la obra.

La falta de terminación en las obras constructivas, la orientación inadecuada de las acciones de mantenimiento y la influencia del medio natural, sumadas al descuido y el maltrato sufrido, agravan la problemática de conservación. Los materiales cerámicos y de base cementicia presentan un alto porcentaje de porosidad y absorción de agua, lo que favorece la aparición y desarrollo de deterioros asociados a la humedad. Estos problemas están estrechamente relacionados con el intercambio de agua entre los materiales y el entorno, afectando la estabilidad y durabilidad de las estructuras.

3.3 Análisis de las condiciones ambientales en el momento del diagnóstico (A)

La Universidad de las Artes en Playa, La Habana, se encuentra en una zona con características geográficas y geológicas interesantes: la región presenta un clima tropical con temperaturas cálidas durante todo el año. Su cercanía al mar influye en la humedad y en la vegetación predominante. La zona combina áreas urbanas con espacios verdes, incluyendo parques y jardines.

La arquitectura de la universidad, con sus estructuras abovedadas, se integra al entorno natural. Con una topografía variable, el suelo está compuesto principalmente por formaciones calcáreas, típicas de muchas áreas de Cuba. Estas rocas han sido moldeadas por procesos kársticos, dando lugar a cuevas y otras formaciones subterráneas, con la presencia de suelos característicos de áreas costeras, según la clasificación de suelos de Cuba, esta región se encuentra en suelos calcáreos, como los Fersialíticos, que son comunes en la provincia de La Habana.

Como se mencionó en el capítulo anterior, entre las variables ambientales que influyen en el deterioro de los inmuebles se encuentran: las precipitaciones; la temperatura del aire; la humedad relativa; la exposición a la radiación solar; la exposición a la dirección del viento; la velocidad del viento; la cercanía al manto freático; los contaminantes atmosféricos (concentración de: CO₂, NO₂, O₃, SO₂ y ruido) (Mendoza et al., 2020).

Para el análisis del comportamiento histórico de estas variables se utilizaron los datos de las estaciones meteorológicas más cercanas y los mapas temáticos como se explicó en el capítulo anterior. El análisis de los datos de la estación meteorológica de Casa Blanca permitió conocer las variaciones de estas variables en la región, donde se localiza el área de estudio.

- **Humedad relativa**

La humedad relativa es elevada durante casi todo el año superando el 70% como promedio y alcanza los valores más altos durante los meses de la temporada húmeda, con un máximo en los meses de septiembre y octubre que corresponden con el período más activo de la temporada ciclónica (figura 18). Al analizar los

valores diarios, los máximos ocurren por lo general, durante la noche, principalmente al final de la madrugada, momento en que la ausencia de radiación solar favorece un predominio de irradiación terrestre, y con ello la pérdida de calor, por lo que el contenido de humedad alcanza los mayores niveles, y en ocasiones el valor máximo de saturación (100%). Sin embargo, los valores mínimos diarios de humedad suceden luego del mediodía, cuando se obtienen los mayores niveles de radiación solar y la temperatura promedia los valores más altos del día (Fonseca et al., 2020)(Fonseca et al., 2020). Según datos reportados por el INSMET durante los cuatro meses más calurosos del año (junio, julio, agosto y septiembre), la variación media diaria de la humedad relativa va desde valores cercanos al 90%, en horarios entre la 04:00 am y 07:00 am hasta valores mínimos entre 68% y 67% los cuales ocurren entre las 10:00 am y la 01:00 pm (figura 18).

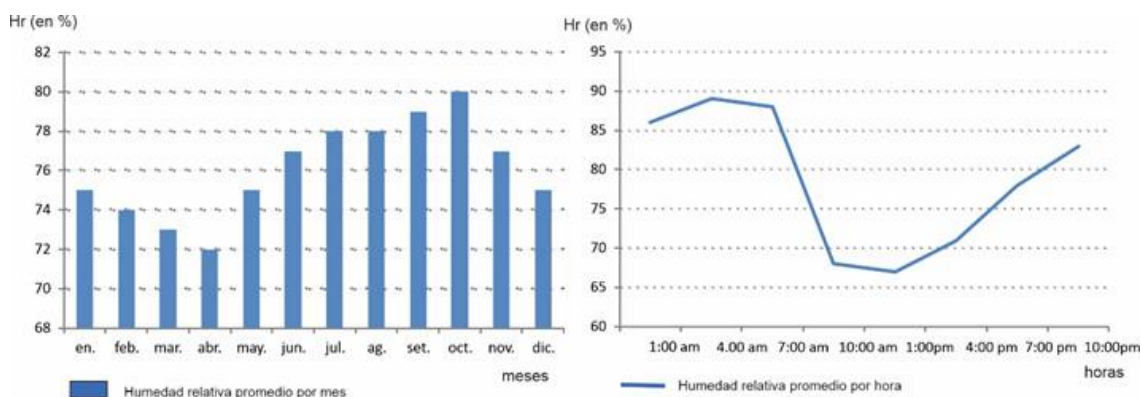


Fig. 18. Humedad relativa promedio por meses del año y horas del día. Fuente: Elaborada por la autora a partir de datos proporcionados por el (INSMET), Cuba de la estación de Casa Blanca.

- **Temperatura atmosférica**

En el caso de la temperatura, los valores registrados también se corresponden con los característicos de la estación, en la figura 19 se representan las variaciones de la temperatura por meses y horas del día. Durante esta etapa estival se alcanzan los valores más elevados de las temperaturas máximas y mínimas, en el período. El promedio diario de la temperatura media del período; cálido (mayo -octubre) es de 26,9° C tal como se puede apreciar en la figura 19 donde los valores mínimos suelen ocurrir entre las 04:00 am y 07:00 am, mientras que los máximos se alcanzan luego del mediodía (Fonseca et al., 2020).

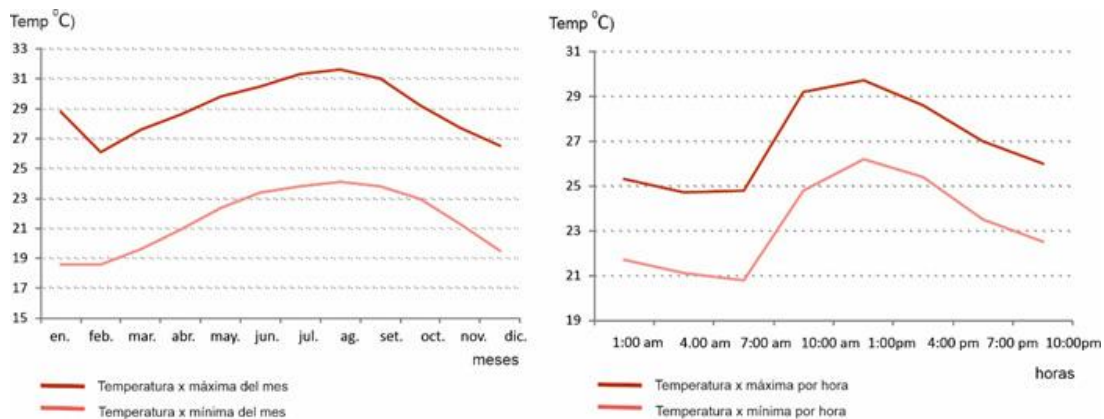


Fig. 19. Temperaturas máximas y mínimas promedio por meses del año y horas del día. Fuente: Elaborada por la autora a partir de datos proporcionados por el (INSMET), Cuba de la estación de Casa Blanca.

• Precipitaciones

Las precipitaciones en la zona de estudio tienen un comportamiento muy similar a lo que ocurre en el país y sobre todo en la región occidental, esta variable tiene una estacionalidad muy marcada durante el año con predominio de dos estaciones una poco lluviosa y otra lluviosa (figura 20). Los valores más elevados durante todo el año se registran en el mes de junio en el segundo mes del período húmedo y luego en septiembre y octubre como resultado del tránsito de huracanes y tormentas tropicales por el occidente de Cuba. Durante los meses de invierno la lluvia está relacionada con la entrada de frentes fríos al país y la presencia de bandas prefrontales que anteceden a los eventos meteorológicos.

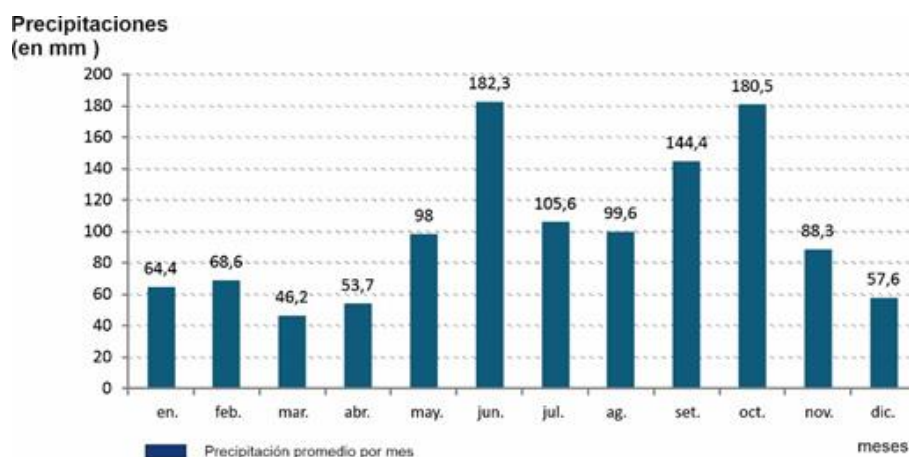


Fig. 20. Precipitaciones por meses de la temporada. Fuente: Elaborada por la autora a partir de datos proporcionados por el (INSMET), Cuba de la estación de Casa Blanca.

- **Exposición al viento**

Los vientos Alisios gobiernan el estado del tiempo la mayor parte del año en el área de estudio. La posición geográfica de Cuba la sitúa en la periferia suroccidental del gran anticiclón subtropical del océano Atlántico septentrional, lo que hace que los vientos con dirección del nordeste al este, producidos por el sistema anticiclónico subtropical incidan la mayor parte del año, con una velocidad media de 4.5m/s (figura 21), aunque en momentos del año cuando el centro anticiclónico oceánico se halla muy retraído y lejos de Cuba y ante la entrada de frentes fríos, los vientos tienen componente suroeste SW y noroeste NW.

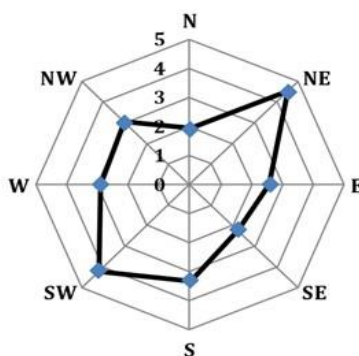


Fig. 21. Dirección predominante de los vientos, estación de Casa Blanca en La Habana. Fuente: (INSMET), Cuba de la estación de Casa Blanca.

- **Contaminantes atmosféricos**

Los valores de concentración obtenidos de los diferentes contaminantes atmosféricos muestreados (CO_2 , NO_2 , O_3 y SO_2) se encuentran por debajo de los límites permisibles que estipula la Norma Cubana NC 1020:2014. “Calidad del aire. Contaminantes. Concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables”, incluyendo que no se reportaron concentraciones de SO_2 y O_3 .

De forma general se puede plantear que los resultados obtenidos del monitoreo de los gases contaminantes en el área de estudio fueron satisfactorios, al obtenerse indicadores que son típicos para entornos con buena calidad del aire.

Es válido enfatizar que durante todo el período de medición hubo incidencia constante del viento con dirección predominante del nordeste. El viento es la variable de mayor importancia e influencia en la dispersión de los contaminantes atmosféricos.

- **El ruido**

Teniendo en cuenta la NC 26: 2012 “Ruidos en zonas habitables. Requisitos Higiénicos Sanitarios”, para áreas urbanizadas estables, se analizó su distribución en diferentes zonas del inmueble, es necesario destacar que siguiendo la norma anterior, las mediciones de ruido se realizaron a más de 1,5m de distancia de cualquier pared o superficie reflectante y entre 1,2– 1,5m sobre el Nivel de Trazado del Piso (NTP), con ángulo vertical del eje longitudinal entre 15 y 25 grados sexagesimales sobre la horizontal, con velocidades del viento inferiores a 3 m/s, en ausencia de precipitación o suelo mojado, en las condiciones más usuales de funcionalidad del entorno. Se realizaron series de lecturas durante períodos de 3 minutos en cada punto de medición.

El monitoreo del ruido de forma continua permitió identificar la presencia de ruido continuo fluctuante y las diferencias entre los valores máximos y mínimos excedieron los 6 dB.

- **Exposición a la radiación solar**

La exposición a la radiación solar está muy relacionada con la latitud geográfica y el relieve en la que se encuentre el inmueble (figura 22).

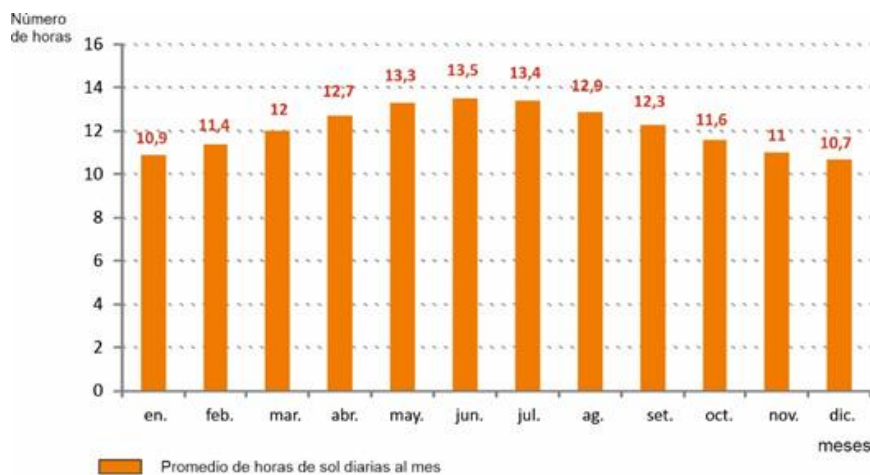


Fig. 22. Promedio de horas de sol diarias al mes. Fuente: Elaborada por la autora a partir de datos proporcionados por el (INSMET), Cuba de la estación de Casa Blanca.

Dado que el área de estudio se encuentra cerca del Trópico de Cáncer y en una llanura costera con elevación cercana al nivel del mar, los meses de mayo, junio y julio superan las 13 horas al día con radiación solar directa, mientras que los meses con menos radiación solar directa son noviembre, diciembre y enero, que

corresponden con el invierno en el hemisferio norte y cuando el sol está cercano al Trópico de Capricornio.

- **Cercanía al manto freático**

El manto freático es la capa de agua subterránea que se acumula en el suelo a una determinada profundidad, saturándolo (Castro, 2020) e influye en la aparición de algunos deterioros como grietas, oxidación de materiales, eflorescencia (depósitos de sales) y manchas en la superficie por la humedad ascendente del agua subterránea que puede infiltrarse en los poros de los ladrillos de paredes y muros (Bueno, 2022).

La topografía del lugar en el que se ubica el área de estudio, su cercanía al río Quibú y a la zona costera hacen que esta variable sea una de las más importantes a considerar para el diagnóstico del deterioro de la instalación, los datos de mediciones obtenidas por la empresa ENIA permiten conocer que el manto freático está a una distancia entre 2.45 y 3.10 metros de la superficie en dependencia de la época del año.

El análisis de las variables anteriores permite seleccionar la mejor época del año para realizar las mediciones, preguntas como ¿en qué momento del año se espera una mayor presencia de alguno de los deterioros en los muros y paredes de la instalación? podrían ser respondidas a partir del análisis; sin embargo en ocasiones los tiempos para el comienzo y la ejecución de las labores de restauración no permiten seleccionar la mejor época del año para llevar a cabo las mediciones de las variables en el área de estudio, lo que puede influir en los resultados del diagnóstico, aunque las diferencias relativas que existen entre los muros y paredes con respecto a su influencia, se mantienen durante todo el año.

Teniendo en cuenta las variaciones de las variables anteriores en el área de estudio, el período ideal para realizar las mediciones de las mismas se correspondería con el final de la temporada húmeda para Cuba y las semanas próximas al solsticio de invierno para el hemisferio norte, momento que se corresponden con los días de menor radiación solar y más horas de sombra y como consecuencia es la época del año en que se manifiestan con mayor intensidad algunas patologías relacionadas con el deterioro.

Este análisis previo permitió seleccionar entre este grupo inicial de variables ambientales que incluyen en el deterioro las que se utilizarían en una segunda etapa para su incorporación al modelo matemático, en lo cual influyó también que existiera variación entre los valores de la variable en el área de estudio en los mapas generados con las mediciones insitu a partir de 22 puntos de muestreo distribuidos por la instalación y su entorno de forma tal que permitiera diferenciar las paredes y muros de acuerdo a su influencia. Es necesario destacar que aunque en el modelo matemático finalmente se consideraron las variables: humedad relativa, temperatura, exposición a la radiación solar, exposición a la dirección predominante de los vientos y cercanía al manto freático, es posible incorporar otras variables en este análisis, según la opinión de los expertos y la disponibilidad de información.

3.4 Cartografía del deterioro en las paredes y muros (B)

3.4.1 Representación cartográfica del inmueble (b1)

La representación del inmueble en la figura 23 representa la cartografía en formato vectorial de la instalación, resultado del empleo de la combinación de los escáneres láser y los vehículos aéreos no tripulados.

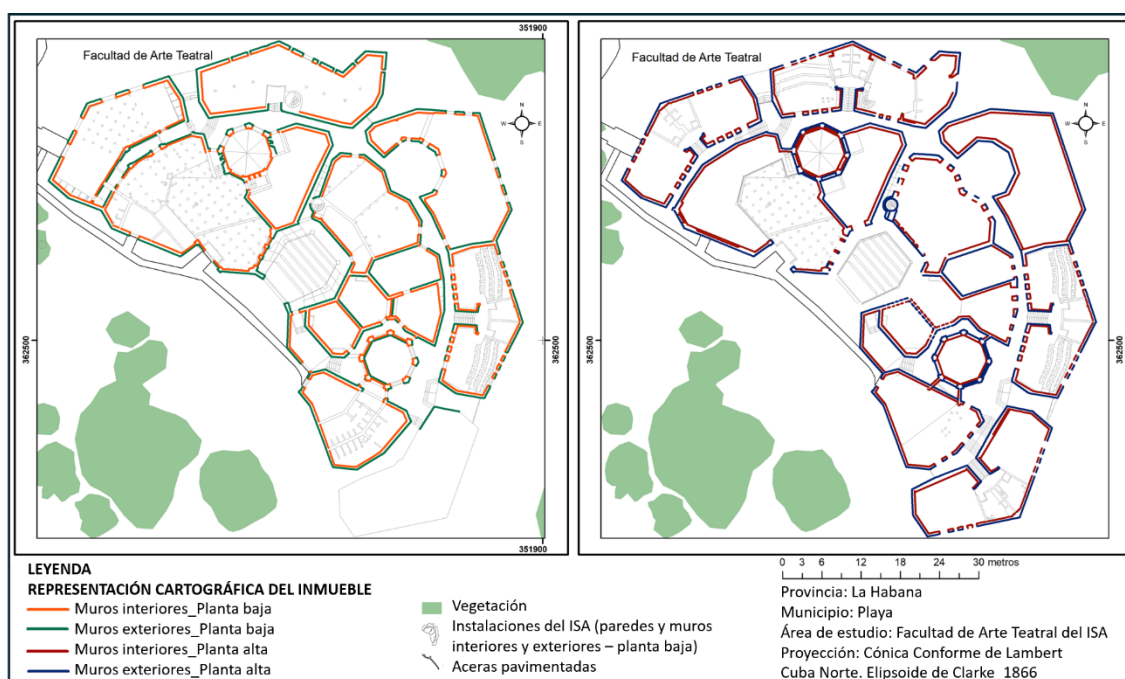


Fig. 23. Representación de las paredes y muros del inmueble. Fuente: elaborada por la autora.

Los vectores de paredes y muros se representan para cada nivel de la infraestructura, tanto para interiores como para exteriores. Para obtener los resultados, se realizaron 430 barridos láser, 4.927 fotografías desde el suelo y 2.031 tomas con vehículos aéreos no tripulados (VANTs).

Tabla 6. Estadísticas de la cartografía de la instalación.

Nivel	Exposición	cantidad de paredes	Longitud promedio del muro o pared	Longitud total (en m)	Longitud total (en %)
nivel 1	exterior	152	5,16	709,12	26,31
nivel 1	interior	150	4,67	643,02	28,41
nivel 2	exterior	167	4,78	799,43	23,35
nivel 2	interior	168	4,29	866,24	21,42
Total				3038,636	100

Fuente: elaborada por la autora.

La representación en el SIG de los vectores permitió extraer las estadísticas y calcular la longitud de las paredes y muros por niveles y exposición (interior exterior) (tabla 6). Es necesario destacar que la representación realizada alcanzó el 100% de todos los muros y paredes de la instalación en su conjunto, sin embargo, teniendo en cuenta los datos obtenidos por métodos tradicionales que se emplearon para la comprobación de los resultados y la validez del modelo propuesto, se eliminaron las paredes y muros que no contaban con información para realizar la comprobación, en la tabla 6 se muestran las estadísticas de la cartografía “en planta” de la instalación que constituyen cerca del 91% de las paredes y muros y en su conjunto alcanza un valor cercano a los 3038 metros de longitud.

En las plantas baja y alta las paredes y muros exteriores tienen una longitud promedio de 5.16 y 4.78m respectivamente, con valores ligeramente superiores a los de las paredes y muros interiores de cada nivel, lo que es reflejo de las propias características arquitectónicas del inmueble y de las divisiones internas en la instalación. Otros de los resultados obtenidos en esta fase que acompañan a la representación vectorial fueron: el Modelo Digital de Superficie (MDS) (anexo 7), las imágenes fotográficas de paredes y muros y el modelo en tres dimensiones de la instalación.

Como parte de los resultados de la modelación HBIM es posible obtener el modelo parametrizado de las instalaciones, como se muestra en la figura 24 y como resultado del procesamiento fotogramétrico empleando el software Agisoft Metashape se obtiene el modelo 3D del área de estudio que permite realizar el modelo tridimensional y recorridos virtuales en él.



Fig. 24. Modelos tridimensionales. Fuente: elaborada por la autora.

El inmueble tiene una altura promedio de 4.57m, las zonas más bajas alcanzan los 1.34m mientras que la mayor altura se localiza hacia el sureste en el bloque 1 con 7.68m en los techos. En la figura 25 se representa el histograma de distribución de alturas promedio de los muros y paredes de la instalación.

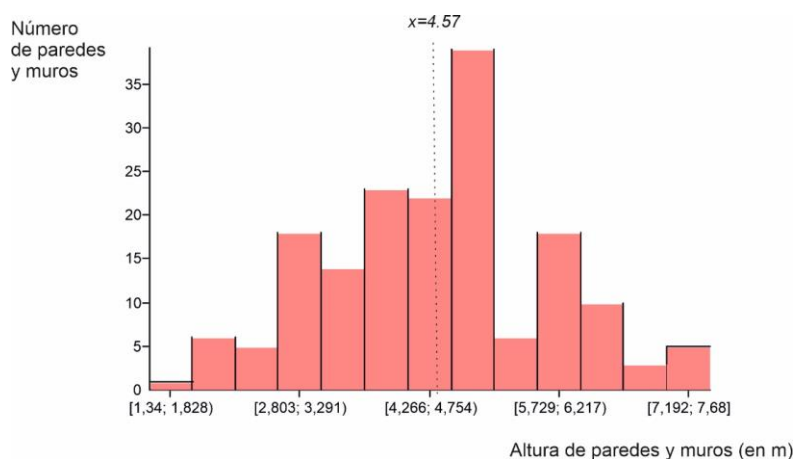


Fig. 25. Histograma de distribución de alturas promedio de los muros y paredes de la instalación. Fuente: elaborada por la autora.

Los fotoplanos relativos a las paredes, las cubiertas y los suelos se han elaborado a partir del modelo 3D. Como resultado del proceso fotogramétrico, se obtienen

también las imágenes que permiten la representación visual de los deterioros en la instalación (figura 26).



Fig. 26. Imágenes fotográficas que representan el estado de deterioro de la instalación. Fuente: elaborada por la autora.

Los resultados anteriores se emplean en las etapas siguientes de la investigación.

3.4.2 Deterioro esperado en el inmueble (b2)

En esta etapa de la aplicación del modelo se elaboraron los mapas de cada una de las variables ambientales a partir de las operaciones de análisis y modelación en el SIG, los mapas temáticos de cada una de estas variables permiten conocer sus variaciones dentro del área de estudio y extraer los valores para el diagnóstico del deterioro.

- **Humedad relativa**

En los anexos 8 y 9 se representan los valores de humedad relativa resultado de la interpolación espacial en el SIG, en el mismo se puede apreciar que oscilan entre los 71.74% y los 86.36% para un día soleado, con mediciones realizadas desde el amanecer hasta la puesta del sol, como era de esperar los valores más elevados se localizan en el extremo norte y noreste en las áreas con mayor predominio de la sombra ya sea por los árboles que rodean a la instalación o la proyectada por las paredes aunque hay ligeras diferencias entre los niveles 1 y 2 de la instalación.

- **Temperatura atmosférica**

Los anexos 10 y 11 representan la variación de la temperatura atmosférica (resultado de la Interpolación espacial en el SIG), la temperatura promedio tiene valores que oscilan entre los 27.9° y los 31.56° para un día soleado, con mediciones realizadas desde el amanecer hasta la puesta del sol; los valores más

elevados en esta variable se obtuvieron en los bloques del sur del inmueble, por sus características hay menos espacio para la circulación del aire y están más expuestos durante el día a la radiación solar sobre todo en horas del mediodía y la tarde lo que se traduce en estas diferencias.

- **Exposición al viento**

La exposición al viento constituye una de las variables que más influye en la aparición de algunos deterioros (García Chávez & Fuentes Freixanet, 2005) (Broto, 2006), ya que además de actuar como agente mecánico también determina la fuerza de impacto de la lluvia sobre las fachadas y es uno de los agentes que puede ser una causa extrínseca devastadora, de igual manera influye sobre los depósitos de partículas que puede estar dado por la contaminación atmosférica. En los anexos 12 y 13 se representa la exposición de las paredes y muros interiores y exteriores a la dirección predominante del viento para el nivel 1 y nivel 2, respectivamente.

- **Exposición a la radiación solar**

Según trabajos consultados (Marino et al., 2020) la exposición de las paredes y muros a la radiación solar puede favorecer o no la aparición de algunos deterioros como alteración cromática, caliches, exfoliaciones, etc. Por la condición de país tropical teniendo en cuenta el recorrido del sol durante el año y las propias características del inmueble (orientación, altura) y del entorno, rodeado de árboles en algunas zonas hacen que existan diferencias importantes entre las horas de sol y de sombra que durante el año reciben las paredes y muros de la instalación, lo que sin duda puede influir en la aparición de los deterioros. En el anexo 16 se representa el mapa de exposición de los muros y paredes a la radiación solar. Como promedio al año hay paredes localizadas hacia el noroeste de la instalación en los bloques 4, 5 y 14, que reciben menos horas de sol en comparación con las paredes y muros ubicadas hacia el suroeste y el este del inmueble en lo que influye la orientación y la vegetación del entorno (anexo 2).

- **Cercanía al manto freático**

La cercanía al manto freático es otra de las variables que puede influir en la aparición de algunos deterioros sobre todo en la planta baja asociado a la

humedad en las paredes (Gutiérrez, 2016), en el presente caso aunque existen diferencias entre la temporada seca y la de lluvia, las diferencias relativas dentro de la instalación se mantienen durante el año, aunque se manifiesten más en una época que en otra. Las zonas más cercanas al manto freático se localizan hacia el noroeste que corresponden con las zonas más bajas y cercanas al río Quibú (anexo 15).

3.5 Representación cartográfica del deterioro potencial del inmueble

Entre los resultados de la etapa que a continuación se describe, se encuentra la representación espacial de cada uno de los deterioros estudiados: alteración cromática (Ac), ataque biológico (Ab), pérdida de material (Pm), depósito superficial (Ds) y desprendimiento (Dp). Los cinco mapas representan las paredes y muros con más condiciones para la aparición de cada uno de los deterioros atendiendo a la influencia de las variables ambientales y la aplicación del modelo matemático utilizado para tales fines. A continuación, se describen algunos de los resultados obtenidos.

3.5.1 Alteración Cromática

La Alteración Cromática (figura 27), agrupa una serie de deterioros entre las que se encuentran: manchas, manchas de humedad, eflorescencia, películas, pátina de óxido de hierro, coladuras y grafitis según los cálculos realizados en el modelo matemático las mayores condiciones para la aparición de grupo de deterioro que se analiza, están creadas en el nivel 1 exterior de la instalación, el 75% de las paredes y muros del nivel tienen las condiciones propicias para la manifestación del tipo de deterioros, le siguen en orden de las Paredes y muros exteriores e interiores del nivel 2 (36,78%) y (35,80%) respectivamente y por último cerca de 19% de las paredes interiores del nivel 1, (figura 28 y tabla 7). En la figura 27 se puede apreciar que las paredes y muros localizadas hacia el extremo norte y este de la instalación tienen mayores condiciones para la aparición del grupo de deterioros.

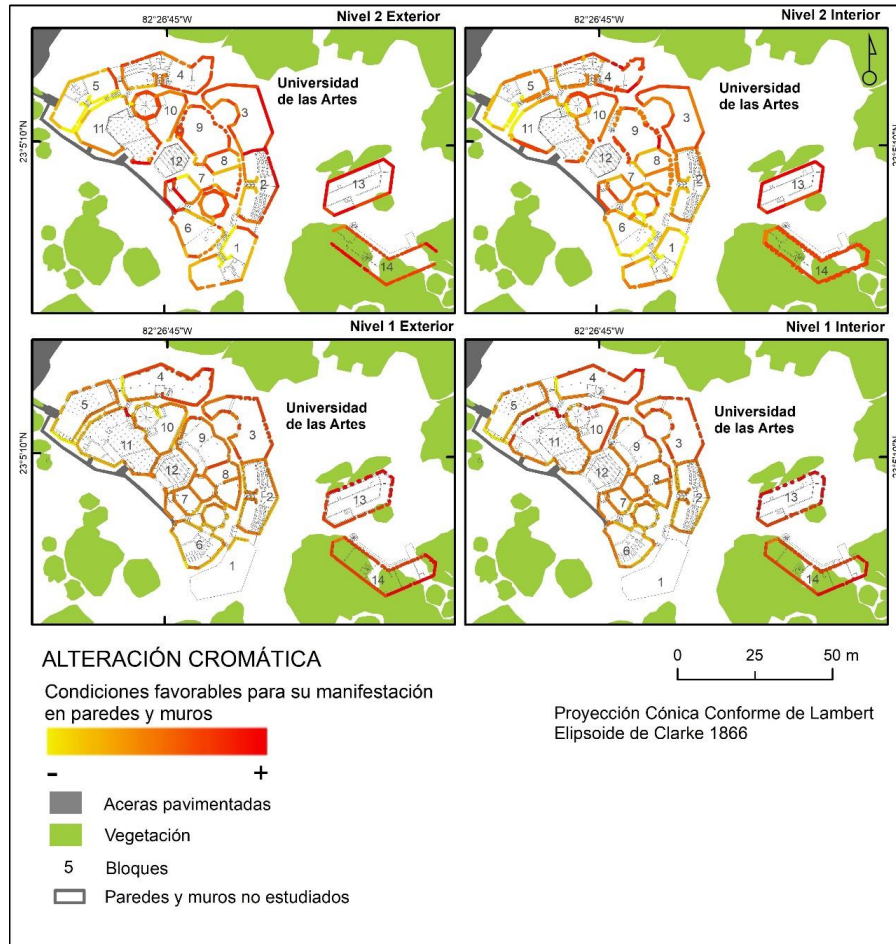


Fig. 27. Mapa de Alteración Cromática en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 y nivel 2 respectivamente. Fuente: elaborada por la autora.

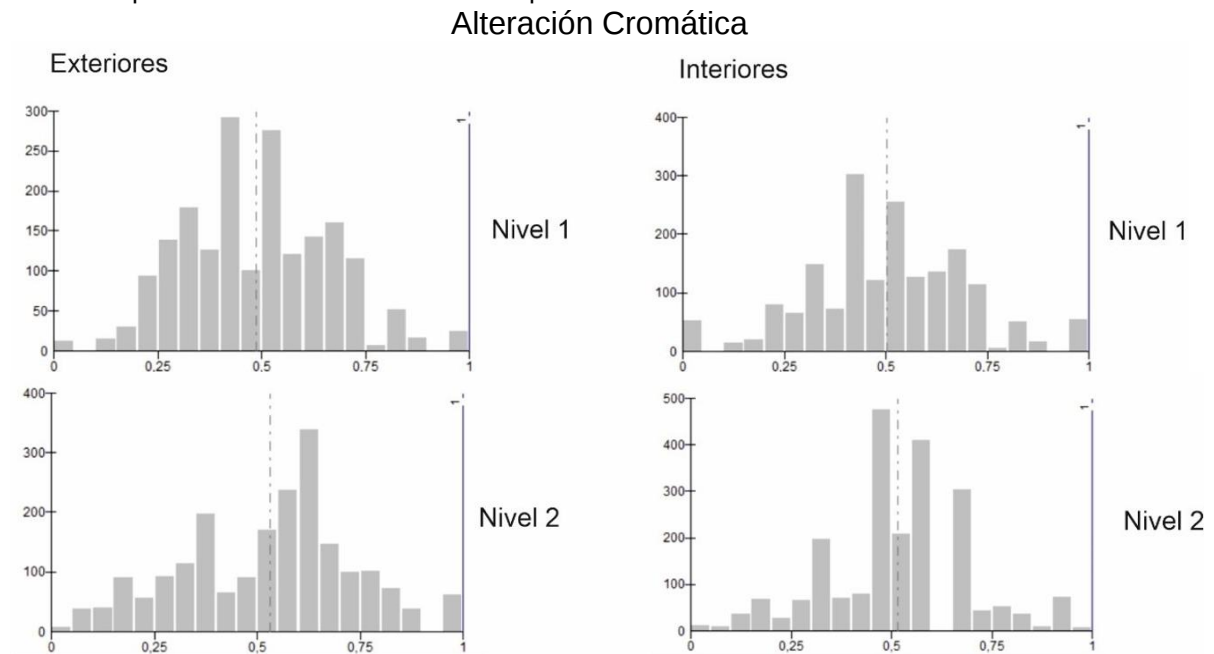


Fig. 28. Histogramas de resumen estadístico de la presencia de alteración cromática en paredes y muros por niveles y ubicación. Fuente elaborada por la autora.

Los histogramas en cada nivel muestran los muros y paredes exteriores que tienen mayores condiciones para la manifestación de alteración cromática, resultado que será comprobado como parte del modelo propuesto.

En estas estadísticas hay que tener en cuenta que en el modelo matemático se analizaron solo cinco variables ambientales, en tanto existen otras agresiones a la instalación que deben ser consideradas en el análisis final y que se obtienen luego de la vinculación entre los elementos del SIG y del HBIM, como pueden ser, factores antrópicos como paredes dibujadas con grafitis y otros naturales como la caída de frutas de árboles, desechos de insectos y murciélagos etc.

Tabla 7. Paredes y muros con mejores condiciones para la aparición de la alteración cromática:

Nivel	Orientación de paredes y muros	Pronóstico Ac	Número de paredes y muros	Número de paredes y muros (en %)	Longitud de paredes y muros (en m)	Longitud de paredes y muros (en %)
nivel 1	exterior	Probabilidad por encima de la media	80	52,63	336,56	47,41
nivel 1	interior	Probabilidad por encima de la media	76	50,67	338,28	52,54
nivel 2	exterior	Probabilidad por encima de la media	93	55,69	489,91	61,28
nivel 2	interior	Probabilidad por encima de la media	84	50	450,06	51,96

Fuente: elaborada por la autora.

3.5.2 Depósito Superficial

La figura 29 representa las zonas con mejores condiciones para la acumulación en las paredes de depósitos superficiales por niveles y ubicación. Los muros exteriores de ambos niveles tienen condiciones más elevadas para que exista presencia de depósito superficial, sobre todo en las fachadas que se encuentran hacia el NE de la instalación, ya que coinciden con la dirección predominante del viento. Los depósitos superficiales en el área de estudio son en su mayoría de origen orgánico (polen, semillas, esporas, etc.) e inorgánicas (arena, hollín, ceniza, polvos de carbón, de mineral de hierro, etc.). Todas ellas son transportadas por el viento y después de permanecer un corto período de tiempo en la atmósfera, se suelen depositar en las fachadas de los edificios cercanos a las fuentes emisoras.

El agua igual que el viento, es un agente de mucha importancia en el proceso de enmugrecer o ensuciar las fachadas y es otro de los agentes que influye en el arrastre y acumulación de materiales en las paredes y muros, por una parte, contribuye al transporte de partículas contaminantes hasta depositarlas en elementos salientes de la fachada o en el interior de los poros del material, y por otro lado, ayuda a la eliminación de partículas ya depositadas en algunas paredes y muros por su ubicación dentro del inmueble, y por tanto, contribuye a la limpieza en algunos casos de las paredes y muros.

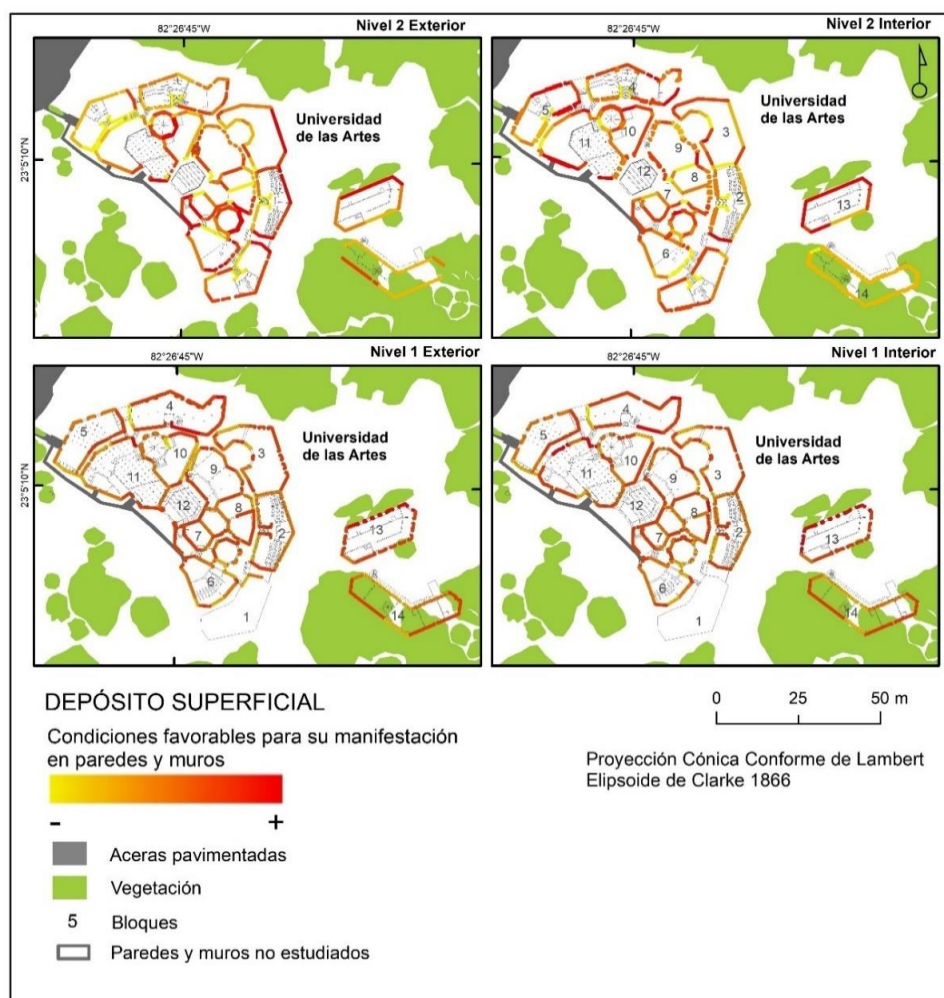


Fig. 29. Mapa de Depósito Superficial en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 y 2 respectivamente. Fuente: elaborada por la autora.

Los histogramas (figura 30 y la tabla 8) muestran que cerca del 51% de las paredes y muros de la instalación tienen condiciones propicias para que se manifieste el tipo de deterioro teniendo en cuenta su disposición dentro del inmueble. En la figura se representan las condiciones favorables.

Depósito Superficial

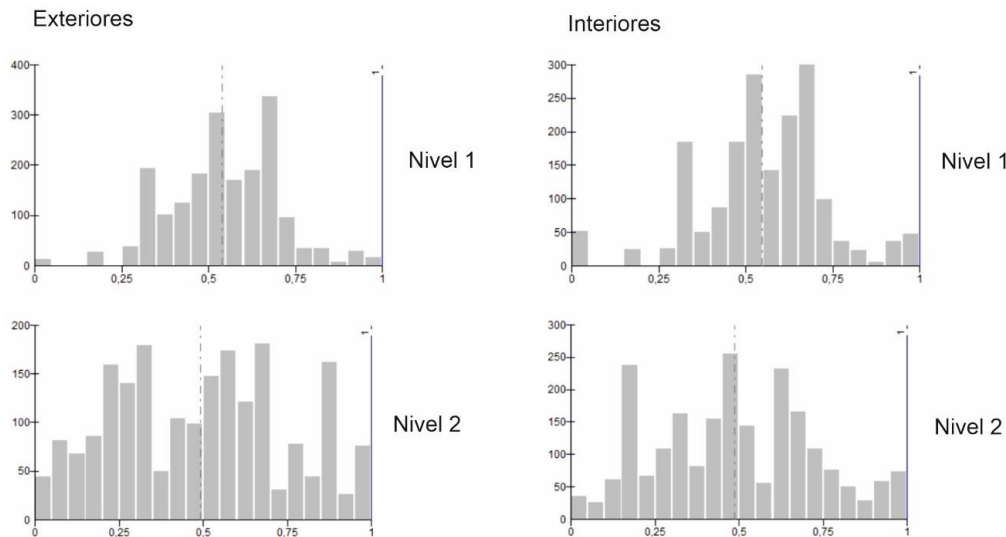


Fig. 30. Histogramas de resumen estadístico de la presencia de depósito superficial en paredes y muros por niveles y ubicación. Fuente: elaborada por la autora.

Tabla 8. Paredes y muros con mejores condiciones para encontrar depósitos superficiales

Nivel	Orientación de paredes y muros	Pronóstico Ds	Número de paredes y muros	Número de paredes y muros (en %)	Longitud de paredes y muros (en m)	Longitud de paredes y muros (en %)
nivel 1	exterior	Probabilidad por encima de la media	78	51,32	379,87	53,51
nivel 1	interior	Probabilidad por encima de la media	77	51,33	320,84	49,83
nivel 2	exterior	Probabilidad por encima de la media	83	49,70	449,53	56,23
nivel 2	interior	Probabilidad por encima de la media	86	51,19	414,37	47,84

Fuente: elaborada por la autora.

3.5.3 Pérdida de Material

En la pérdida de material se incluyen deterioros como: erosión, cortes/incisión, pulverización, disgregación y perforación. Según los resultados del modelo aplicado, las condiciones más favorables para la manifestación del tipo de deterioro que se analiza en la instalación están en las paredes exteriores localizadas en el nivel 1 y nivel 2 de la instalación. Además de la influencia que

pueden ejercer las variables ambientales la calidad de los materiales de las construcciones es un aspecto a tener en cuenta.

Como se representa en el mapa (figura 31) la pérdida de material se manifiesta más en paredes y muros ubicados en exteriores a lo largo del tiempo por estar expuestos con mayor incidencia a la radiación solar, los cambios de temperatura, la presencia de agua ya sea por la humedad relativa o por capilaridad, por la cercanía de los muros de la planta baja al manto freático o por estar expuestos la dirección predominante del viento.

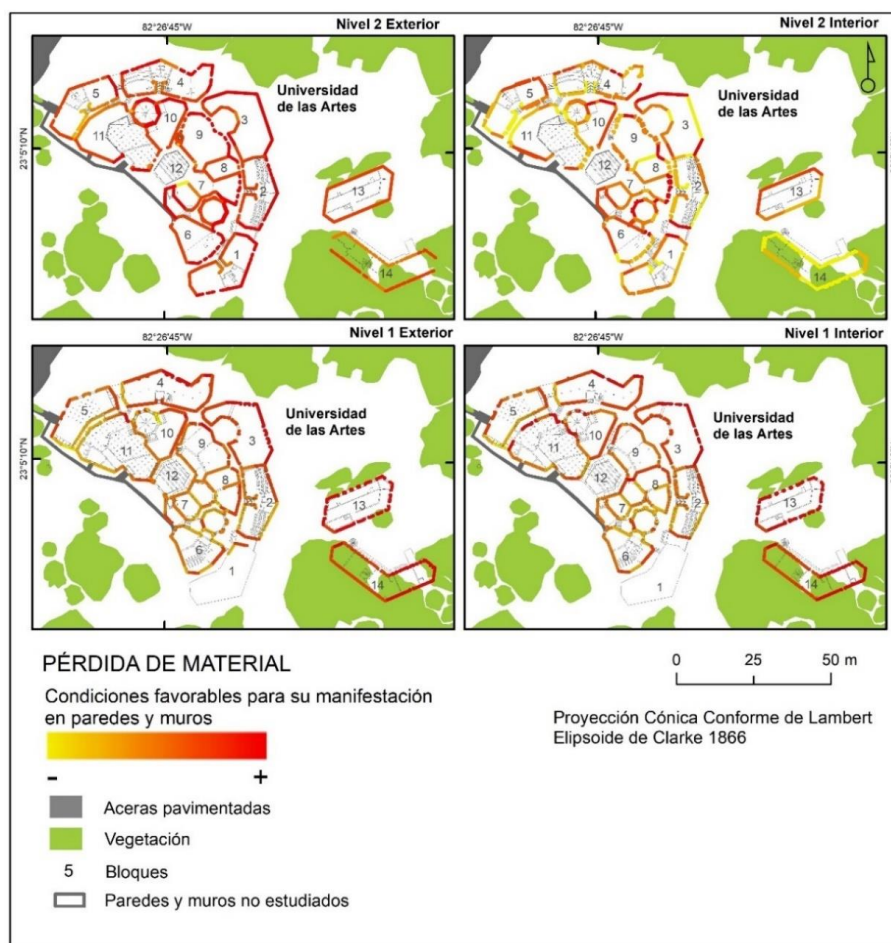


Fig. 31. Mapa de Pérdida de Material en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 y nivel 2 respectivamente. Fuente: elaborada por la autora.

La interacción entre estos factores contribuye a la pérdida de material en los muros de ladrillos. Las estadísticas indican que aproximadamente el 40% de las paredes y muros de la instalación presentan condiciones propicias para la aparición del presente tipo de deterioro (figura 32 y tabla 9).

Pérdida de Material

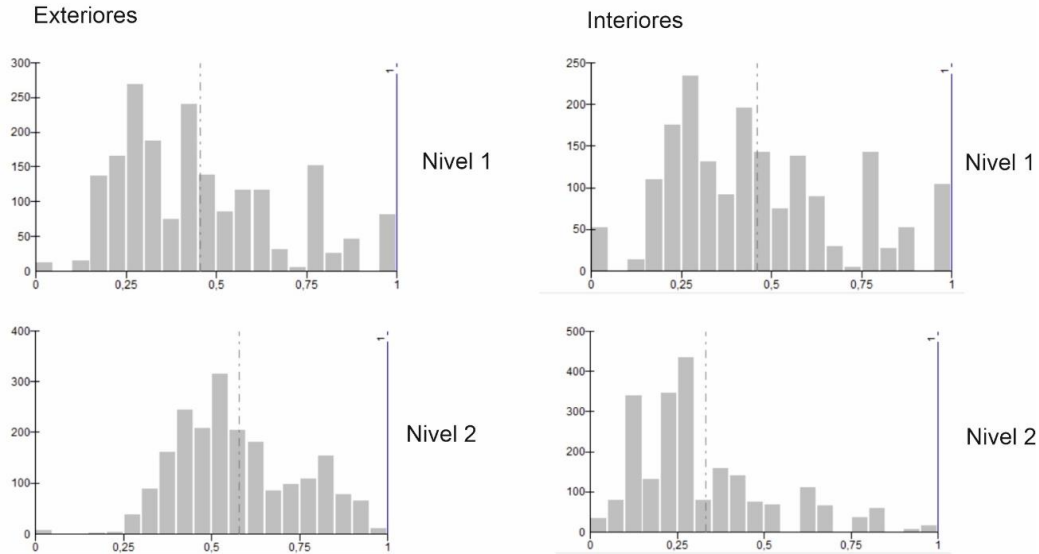


Fig. 32. Histogramas de resumen estadístico de la presencia de Pérdida de Material en paredes y muros por niveles y ubicación. Fuente: elaborada por la autora.

Tabla 9. Paredes y muros con condiciones más favorables para la pérdida de material.

Nivel	Orientación de paredes y muros	Pronóstico Pm	Número de paredes y muros	Número de paredes y muros (en %)	Longitud de paredes y muros (en m)	Longitud de paredes y muros (en %)
nivel 1	exterior	Probabilidad por encima de la media	65	42,76	344,22	48,49
nivel 1	interior	Probabilidad por encima de la media	66	44,00	289,70	44,99
nivel 2	exterior	Probabilidad por encima de la media	75	44,91	364,77	45,63
nivel 2	interior	Probabilidad por encima de la media	66	39,29	288,84	33,34

Fuente: elaborada por la autora.

3.5.4 Desprendimiento

El desprendimiento incluye: la descamación, las explicaciones, la exfoliación y el despegue (figura 33). Las condiciones más favorables para la aparición de este tipo de deterioro se encuentran en los muros y paredes ubicados en el nivel 1 exteriores de la instalación (ver histogramas figura 34 y tabla 10).

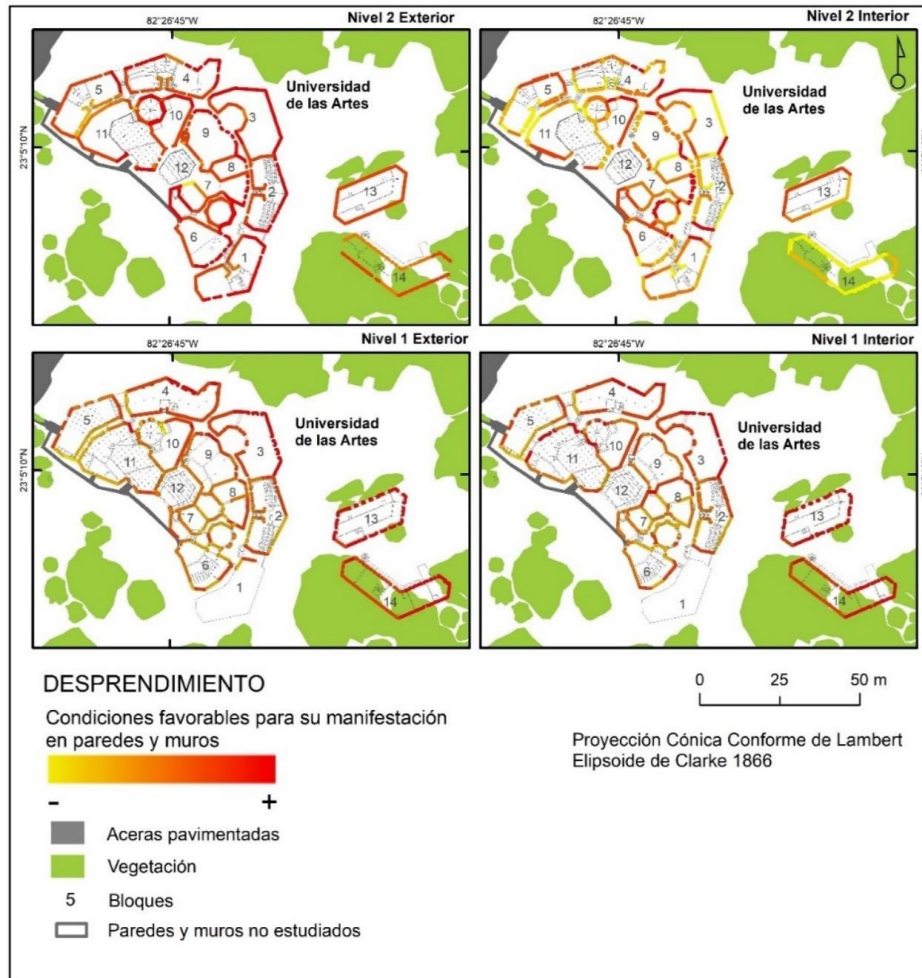


Fig. 33. Mapa de Desprendimientos en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 y nivel 2 respectivamente. Fuente: elaborada por la autora.

En el mapa (figura 33) se representan los muros que poseen las condiciones favorables para la ocurrencia de desprendimientos, estas condiciones se acentúan en las fachadas y exteriores de la instalación por la influencia de la temperatura ya que las variaciones térmicas pueden provocar dilatación y contracción en los ladrillos lo que puede generar tensiones y con el tiempo contribuir al desprendimiento si los ladrillos no están bien curados o si se someten a cambios bruscos de temperatura pueden sufrir fisuras y debilitamiento.

Desprendimientos

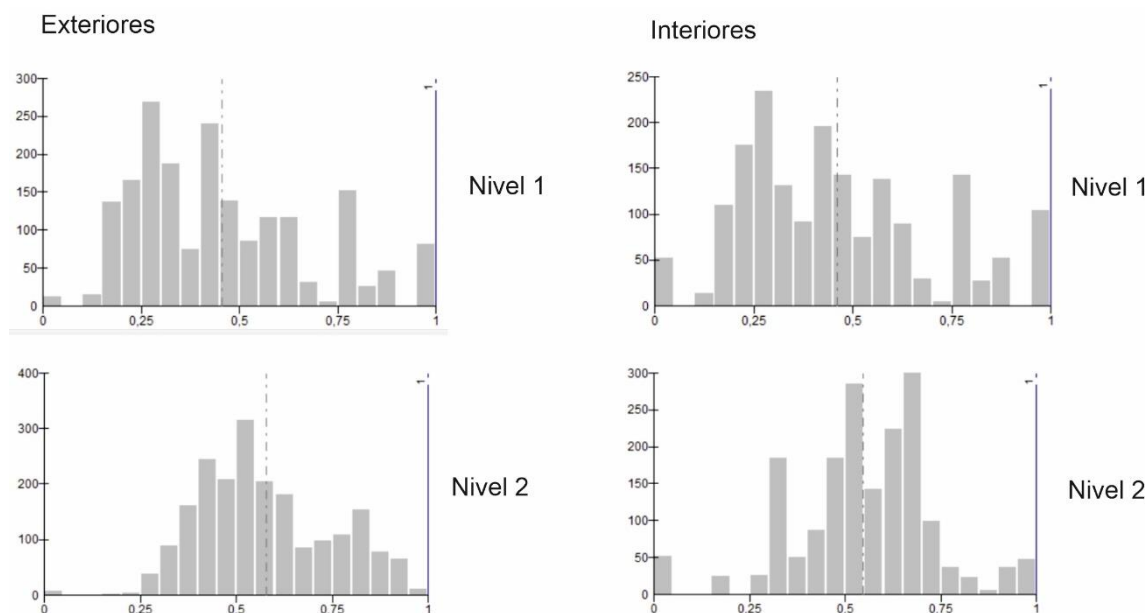


Fig. 34. Histogramas de resumen estadístico de la presencia de Desprendimientos en paredes y muros por niveles y ubicación. Fuente elaborada por la autora

Tabla 10. Paredes y muros con condiciones más favorables para el desprendimiento. Fuente: Elaborada por la autora.

Nivel	Orientación de paredes y muros	Pronóstico Dp	Número de paredes y muros	Número de paredes y muros (en %)	Longitud de paredes y muros (en m)	Longitud de paredes y muros (en %)
nivel 1	exterior	Probabilidad por encima de la media	62	40,79	323,53	45,58
nivel 1	interior	Probabilidad por encima de la media	66	44,00	289,70	44,99
nivel 2	exterior	Probabilidad por encima de la media	75	44,91	364,77	45,63
nivel 2	interior	Probabilidad por encima de la media	66	39,29	288,84	33,34

3.5.5 Colonización Biológica

La colonización biológica es uno de los deterioros que más afecta a la instalación de manera general sobre todo en las paredes exteriores de ambos niveles, al estar más expuestas a la incidencia de las variables ambientales como la radiación solar, la temperatura y la humedad (figura 35, 36 y tabla 11). Las paredes de los bloques 13 y 14 de la instalación poseen un alto nivel de colonización biológica ya

sea asociada a la presencia de vegetación o ataque biológico. Los organismos fotógrafos, como cianobacterias, algas, líquenes y musgos, pueden colonizar los ladrillos en respuesta a las variaciones de la temperatura. La exposición prolongada al calor solar puede favorecer el crecimiento de los organismos en las superficies de los muros. La condensación y la humedad ascendente desde el suelo también pueden contribuir a la proliferación de organismos en los muros y paredes más cercanos al nivel freático.

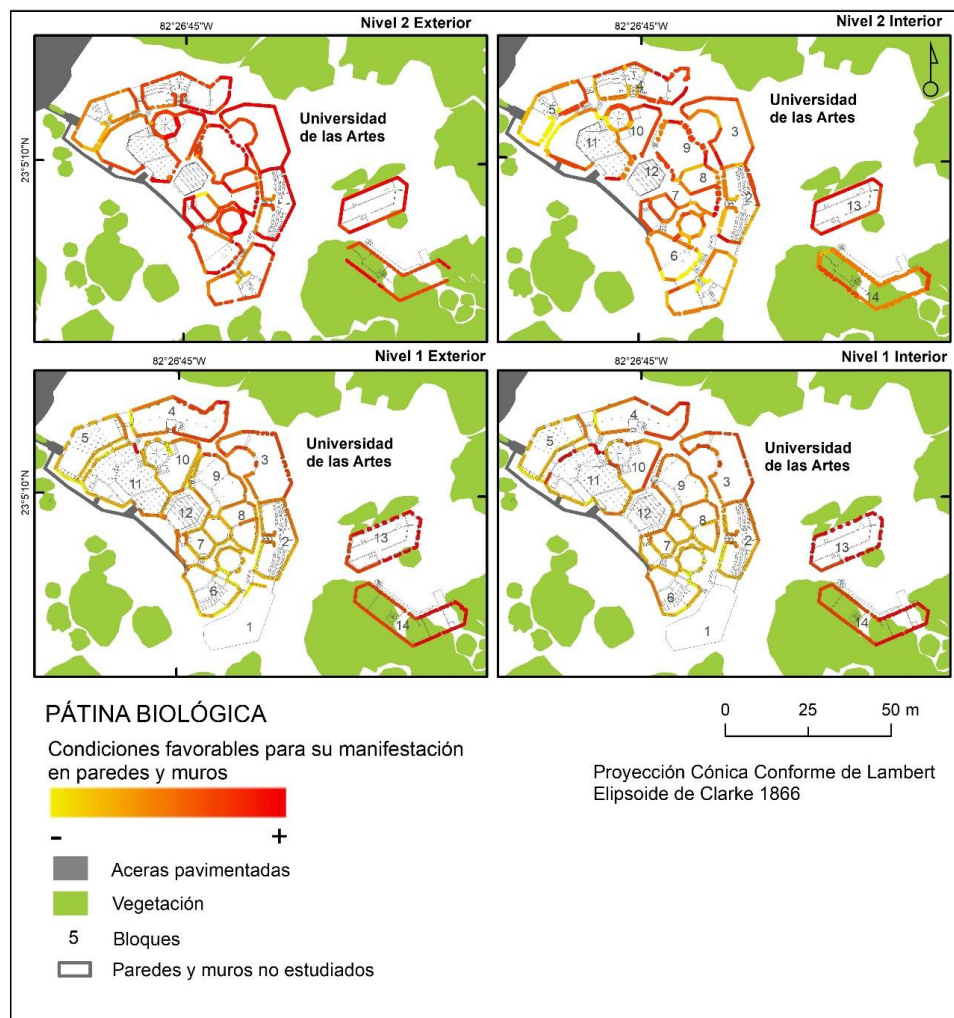


Fig. 35. Mapa de Pátina Biológica en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 y nivel 2. Fuente: elaborada por la autora.

Colonización Biológica

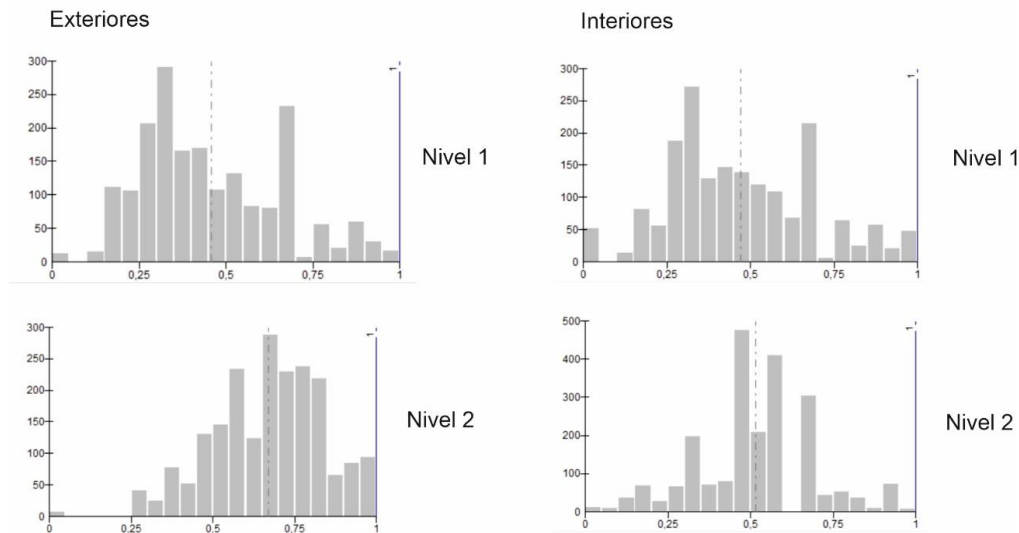


Fig. 36. Histogramas de resumen estadístico de la presencia de Ataque Biológico en paredes y muros por niveles y ubicación. Fuente elaborada por la autora.

Tabla 11. Paredes y muros con condiciones más favorables para el Ataque biológico. Fuente: elaborada por la autora.

Nivel	Orientación de paredes y muros	Pronóstico Ab	Número de paredes y muros	Número de paredes y muros (en %)	Longitud de paredes y muros (en m)	Longitud de paredes y muros (en %)
nivel 1	exterior	Probabilidad por encima de la media	97	63,82	483,07	68,05
nivel 1	interior	Probabilidad por encima de la media	64	42,67	301,22	46,78
nivel 2	exterior	Probabilidad por encima de la media	93	55,69	487,81	61,02
nivel 2	interior	Probabilidad por encima de la media	43	25,60	181,01	20,90

3.6 Modelo HBIM-SIG y diagnóstico del PA (C)

La vinculación de los elementos geométricos y de la información de las bases de datos entre el Sistema de Información Geográfica y el modelo de Información de la Edificación Patrimonial permitió obtener un modelo HBIM-SIG que se visualiza en la plataforma desarrollada como resultado de la aplicación del modelo propuesto (figura 37), la cual se denomina SIGEDPA “Sistema para la Gestión y Diagnóstico del Patrimonio Arquitectónico”. La figura representa algunos de los resultados que se obtienen a partir de la vinculación de los datos, su geometría y atributos con las

variables ambientales las cuales influyen en la aparición de deterioros de la edificación.

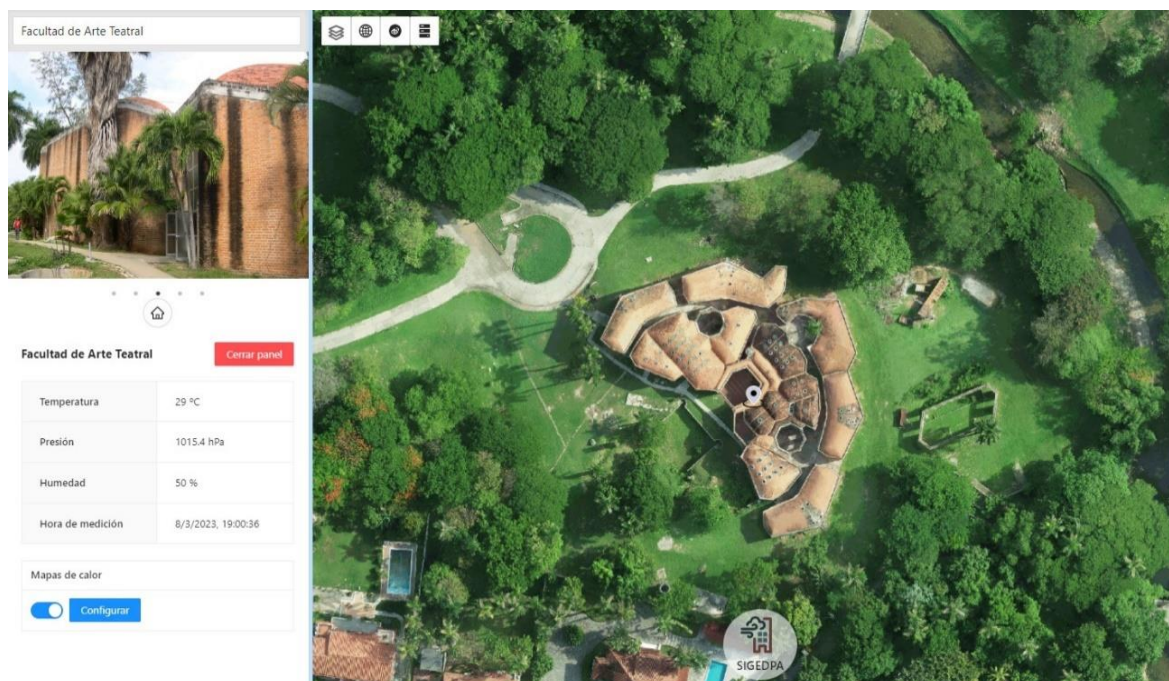


Fig. 37. Obtención del modelo HBIM-SIG. Fuente: elaborada por la autora

La vinculación de los datos espaciales y sus atributos permite seleccionar a partir de la cartografía en 2D del Sistema de Información Geográfica, las paredes muros (Figura 38-1). Esta selección permite visualizar automáticamente el muro o pared correspondiente en una misma vista.

El empleo de las técnicas de levantamiento para la creación de los SIG y los modelos HBIM y su vinculación permite realizar un diagnóstico preliminar que se realiza de manera visual por los especialistas a partir de la creación de planos. Una de las ventajas de esta integración es que permite emplean las potencialidades de ambas tecnologías (figura 38-2). Esta vinculación permite integrar la cartografía de las paredes y muros con la información del deterioro potencial, con las fotografías tomadas, lo que facilita la identificación de los deterioros y su dibujo sobre las imágenes fotográficas con vistas a estimar la superficie afectada en cada pared y muro (figura 38-3).

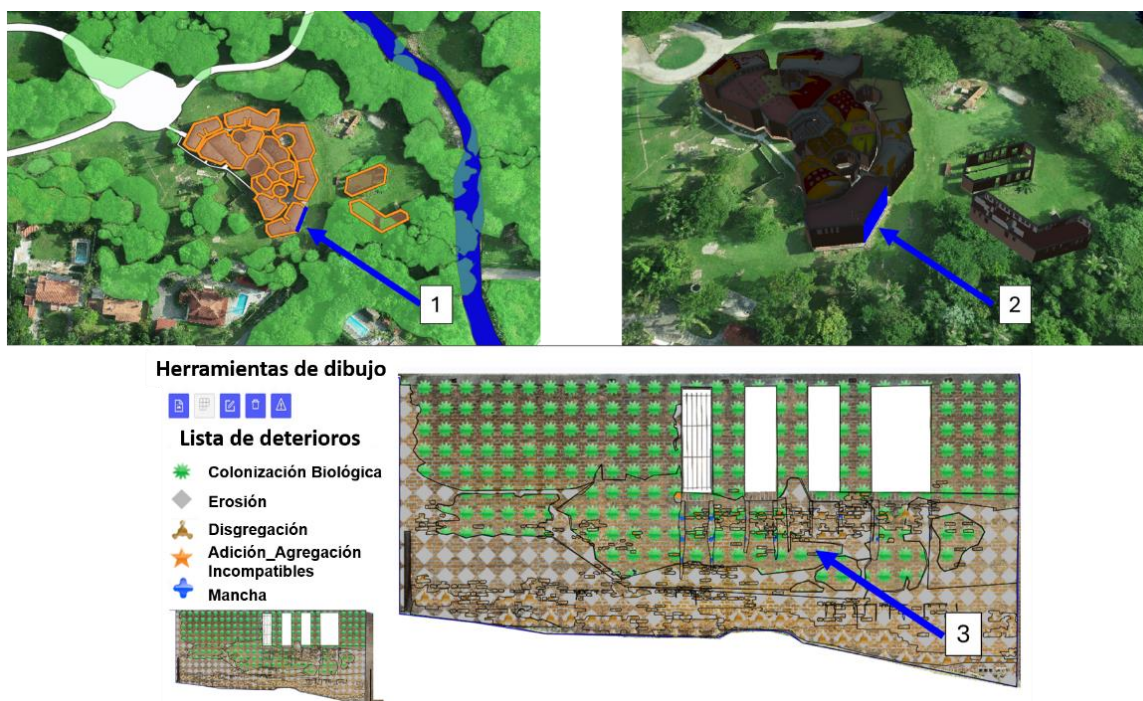


Fig. 38. Representación del deterioro en paredes y muros, modelo HBIM-SIG. Fuente: elaborada por la autora

Otro de los resultados de la vinculación es poder generar los informes. El análisis permite generar dos tipos de reportes, el primero (anexo 16) asociado al elemento constructivo, con la identificación del muro, que detalla los deterioros presentes en ese muro o pared, define los síntomas o manifestaciones de los deterioros y las condiciones que lo propician. En el informe se incluye además del comportamiento y la incidencia que tiene en el elemento constructivo, (muro o pared) las variables ambientales, de esta manera a partir de la vinculación que tiene el modelo HBIM con los datos incluidos en el Sistema de Información Geográfica a partir del análisis espacial y de la modelación matemática. El segundo modelo incluye un resumen de todos los deterioros presentes por Bloque de edificios (anexo 17).

La vinculación HBIM-SIG permite, además, realizar consultas estadísticas, asociadas a la representación de las paredes y muros en segunda y tercera dimensión, de esta manera se pueden hacer análisis, por ejemplo, extraer todos los muros menores de 15 cm, las ventanas de madera, los techos de bóvedas, las puertas etc., o sea permite identificar y extraer todos los elementos presentes en el HBIM que facilitan los análisis y la planificación en la toma de decisiones.

Además, posibilita obtener los planos de deterioros por cada uno de las paredes y muros tanto en interiores como en exteriores para ambos niveles, el dibujo sobre las imágenes fotográficas de alta resolución permite obtener un producto terminado de la superficie con cada deterioro en los muros y paredes de la instalación (figura 38-3).

Uno de los resultados más interesantes que constituye un producto derivado del enlace HBIM-SIG son los mapas de gravedad del deterioro y prioridad de intervención.

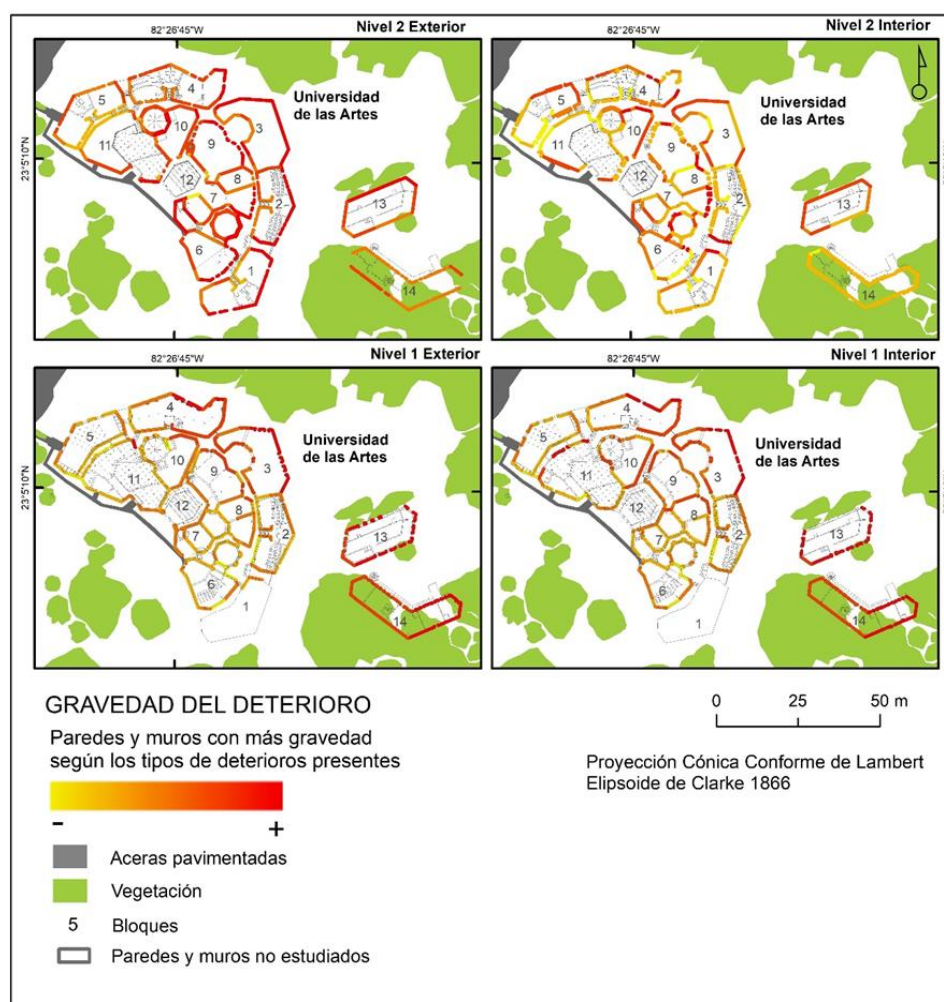


Fig. 39. Mapas de gravedad en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 y nivel 2 respectivamente a partir del análisis multicriterio. Fuente: elaborada por la autora.

Los dos productos derivados del análisis multicriterio permitieron identificar las zonas de la instalación con mayor gravedad (figura 39) y establecer el punto de inicio para las labores de restauración (figura 40). La representación gráfica

muestra que aproximadamente el 14% y el 11% de las paredes exteriores en los niveles 1 y 2 presentan los daños más severos, con una concentración predominante en las áreas norte y este del inmueble (figuras 41 y 42).

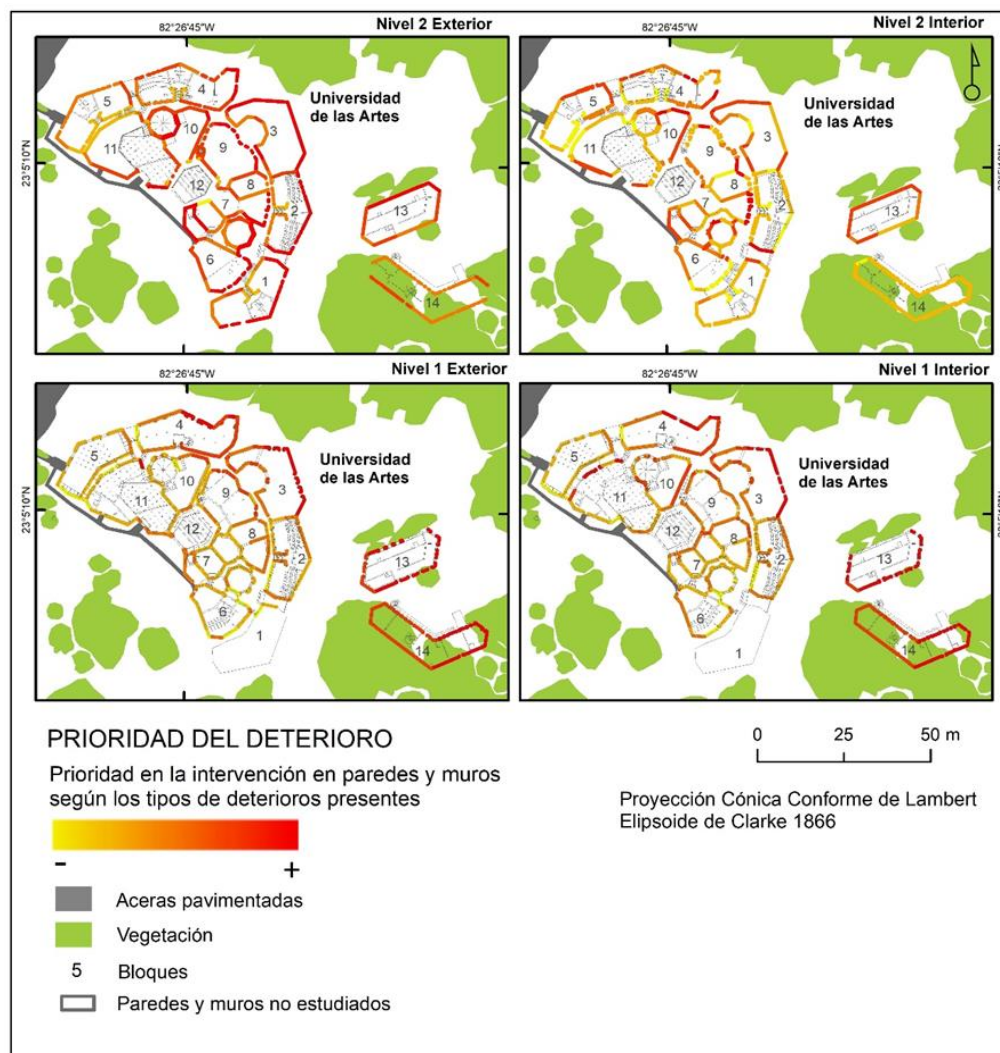


Fig. 40. Mapas de prioridad en la intervención en los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1 a partir del análisis multicriterio. Fuente: elaborada por la autora.

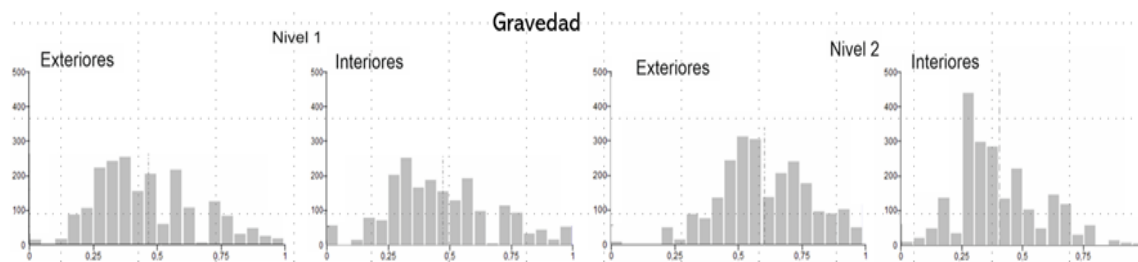


Fig. 41. Histogramas que representan gravedad de los deterioros en paredes y muros en nivel 1 y nivel 2. Fuente: elaborada por la autora.

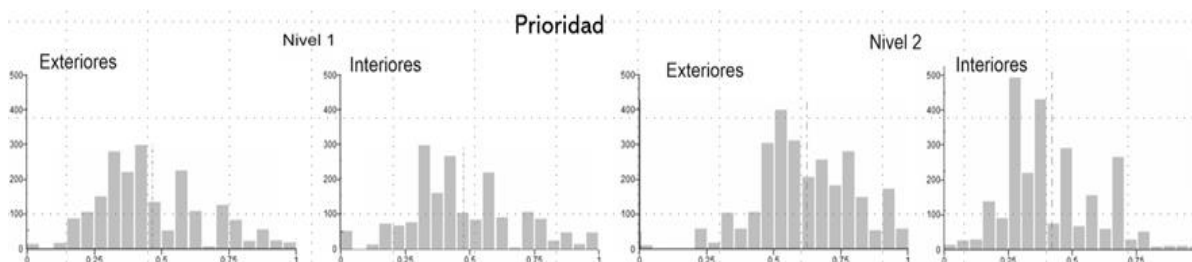


Fig. 42. Histogramas que representan prioridad en la intervención en paredes y muros en nivel 1 y nivel 2. Fuente: elaborada por la autora.

En el anexo 18 se representan las estadísticas obtenidas con el SIG luego de la aplicación de las técnicas multicriterio, teniendo en cuenta los deterioros, su manifestación e influencia en las paredes y muros, en la misma quedaron resumidas para los niveles interior y exterior del inmueble las paredes y muros con más gravedad por tener varios tipos de deterioros y el orden de prioridad teniendo en cuenta la complejidad de las intervenciones para su restauración.

3.7 Inventario de signos de deterioro de la infraestructura por métodos tradicionales (D)

En la presente investigación, se elaboró una base cartográfica sobre la manifestación de los deterioros en el área de estudio, conformada por un total de 667 reportes distribuidos en toda la instalación. Los datos fueron obtenidos a partir de los levantamientos realizados por especialistas que emplearon métodos tradicionales de diagnóstico bajo la dirección del proyecto “Que no baje el telón”. La información recopilada proporcionó una representación detallada de los deterioros presentes en las paredes y muros de la edificación.

Con base en los resultados, se desarrolló un resumen que consolidó los principales deterioros detectados, organizado en una tabla presentada en el anexo 6. Esta tabla sirvió como muestra representativa para la validación del modelo HBIM-SIG, permitiendo la contrastación entre los datos obtenidos por los métodos tradicionales y los mapas de deterioro generados a través de las tecnologías integradas.

El trabajo llevado a cabo por los especialistas, mediante los métodos tradicionales, no solo garantizó la calidad y precisión de los datos de entrada, sino que también permitió estructurar la información de manera óptima para su incorporación al

modelo desarrollado. El presente proceso confirmó la eficacia del modelo propuesto, facilitando el análisis de sus limitaciones y destacando la relevancia de la integración HBIM-SIG en el diagnóstico del deterioro del PA.

3.8 Validación del modelo propuesto (E)

La validación de los resultados obtenidos mediante el modelo HBIM-SIG representa una etapa esencial de la presente investigación. El proceso busca confirmar la eficacia del modelo en el diagnóstico del deterioro del PA, asegurando su aplicabilidad práctica y consolidándolo como un aporte científico innovador.

El objetivo central de esta etapa es comparar los diagnósticos generados por el modelo HBIM-SIG con los obtenidos mediante métodos tradicionales, evaluando la concordancia entre ambas fuentes de datos. El análisis realizado permite identificar fortalezas y limitaciones del modelo, así como áreas de mejora para futuras aplicaciones.

La validación del modelo se realizó a través de un enfoque estructurado, compuesto por las siguientes fases:

1. Definición de las categorías de deterioro: Se seleccionaron las principales categorías de deterioro relevantes para el análisis: desprendimientos, pérdida de material, ataque biológico, humedad y depósitos superficiales. Estas categorías fueron definidas previamente en el capítulo 2 y se utilizaron como referencia para comparar los diagnósticos generados por el modelo y los observados mediante inspecciones tradicionales.
2. Construcción de la matriz de confusión: Los resultados de cada categoría fueron organizados en una matriz de confusión, que permitió identificar las coincidencias y discrepancias entre los diagnósticos obtenidos mediante ambos métodos.
3. Cálculo del índice de Kappa: Se utilizó el índice de Kappa para medir el grado de concordancia ajustado por el azar. El cálculo se realizó con base en la metodología descrita en el capítulo 2, retomando aquí su aplicación práctica para interpretar los resultados obtenidos. Los valores de Kappa permitieron evaluar la precisión del modelo y clasificar el nivel de acuerdo entre las dos fuentes de datos (anexos 19 y 20).

4. Evaluación visual complementaria: Además del análisis estadístico, se llevó a cabo una revisión cualitativa de los mapas temáticos y modelos tridimensionales generados por el sistema. Esta revisión permitió corroborar visualmente la claridad y utilidad de los productos generados para la planificación de intervenciones en el PA.

La validación arrojó los siguientes resultados:

- Concordancia sustancial ($\kappa > 0.6$ \ k $\kappa > 0.6$) en categorías como desprendimientos y pérdida de material, lo que confirma la precisión del modelo para diagnosticar deterioros de fácil identificación.
- Concordancia moderada ($\kappa = 0.40 - 0.60$ \ k $\kappa = 0.50 - 0.60$) en categorías como alteraciones cromáticas.
- Concordancia leve ($\kappa < 0.40$ \ k $\kappa < 0.40$) en depósitos superficiales, debido a la dificultad para detectar ciertos deterioros en las imágenes fotográficas, lo que refleja la necesidad de mejorar la capacidad de identificación en esta categoría mediante el uso de tecnologías complementarias.

En términos generales, las mayores concordancias se registraron en las paredes y muros exteriores de los niveles 1 y 2, donde las manifestaciones de deterioro son más visibles debido a su exposición a factores ambientales como humedad y radiación solar. Por el contrario, las paredes internas mostraron menor concordancia, ya que su protección contra agentes externos dificulta la identificación precisa de ciertos deterioros.

Los expertos en conservación patrimonial evaluaron los mapas temáticos y modelos tridimensionales generados por el sistema, destacando su utilidad para identificar áreas críticas de intervención y priorizar tareas de mantenimiento.

La validación mediante el índice de Kappa no solo posiciona al modelo HBIM-SIG como una herramienta fiable para el diagnóstico del deterioro del PA, sino que también establece un estándar replicable para futuros estudios. El enfoque interdisciplinario demuestra que la integración de SIG y HBIM puede superar las limitaciones de los métodos tradicionales, maximizando la precisión y eficiencia del análisis.

Si bien el modelo ha mostrado ser efectivo en múltiples categorías, los resultados de concordancia más bajos reflejan áreas donde se pueden implementar mejoras:

- Adoptar tecnologías avanzadas, como análisis térmicos, sensores especializados y estaciones permanentes, para realizar un monitoreo continuo y un estudio más detallado del área de interés, con el objetivo de mejorar la precisión y calidad de los datos recopilados.
- Refinar las representaciones de los factores ambientales en las simulaciones, optimizando la conexión entre las variables ambientales y los diagnósticos.

La validación del modelo HBIM-SIG reafirma su utilidad como una herramienta innovadora para el diagnóstico integral del PA. El análisis estadístico y la revisión visual de los resultados no solo respalda su viabilidad, sino que también lo posiciona como un estándar interdisciplinario adaptable para la conservación patrimonial en diferentes contextos.

En las diferencias entre los distintos deterioros pudo haber influido que algunos son más difíciles de diagnosticar de manera supervisada que otros ya sea por su interpretación y reconocimiento en las imágenes fotográficas de las paredes y muros o por la complejidad en la representación de los factores ambientales y su influencia en los mismos.

Como parte del proceso de investigación los resultados fueron publicados en diferentes revistas científicas en los que, de manera parcial se fueron presentando las diferentes etapas de la investigación hasta la obtención de los productos finales (Hernández Peña, 2023, 2024; Hernández Peña et al., 2024).

3.8.1 Limitaciones del modelo propuesto y de los resultados del estudio

En algunos tipos de deterioros los resultados del diagnóstico, obtenidos de la vinculación del modelo matemático con la interpretación de las fotografías del HBIM pudieran parecer bajos, sin embargo, hay factores que hay que tener en cuenta en los resultados entre los que se pueden enumerar:

- La instalación fue construida por ladrillos de diferentes fábricas con calidades diferentes, en algunos bloques de la instalación se han llevado a cabo labores de mantenimiento y en otros no y no se cuenta con un inventario detallado de los

lugares donde se han realizado y la calidad de los mismos, otro factor es que el área de estudio es muy amplia con múltiples accesos, algunas paredes y muros están más alejados de los lugares custodiados y han sido objeto de hechos vandálicos como consecuencia de la acción antrópica y los deterioros no son resultado de la modelación matemática de los factores ambientales.

- El poder contar con estaciones meteorológicas automáticas o con cámaras térmicas colocadas en vehículos aéreos no tripulados que midan variables ambientales como la temperatura que se coloquen durante ciclos, podría mejorar la información sobre los factores y las variaciones diarias en el área de estudio y mejorar la precisión del diagnóstico.

El modelo desarrollado se aplica específicamente a paredes y muros, debido al nivel de complejidad inherente al análisis de la interacción entre las variables ambientales y los materiales constructivos. En el caso que se analiza, se han creado bases de datos detalladas que registran la incidencia de factores como la humedad, temperatura, viento, radiación solar, cercanía al manto freático sobre el material predominante en los elementos estudiados, en particular el ladrillo. El enfoque permite evaluar con mayor precisión los deterioros asociados a los muros y paredes, que suelen ser los componentes más expuestos a condiciones ambientales adversas y representan un riesgo estructural significativo para edificaciones patrimoniales.

Sin embargo, el modelo es potencialmente aplicable a otros elementos de la edificación y en otros casos de estudio, siempre y cuando se desarrollen bases de datos específicas que contemplen la relación entre las variables ambientales y el tipo de material correspondiente. Según el criterio de especialistas en cada caso, es posible adaptar la metodología para incluir techos, columnas u otros componentes, asegurando que el diagnóstico y la representación del deterioro mantengan su nivel de precisión y utilidad. El planteamiento refuerza la versatilidad del modelo al ofrecer una herramienta flexible y expansiva para el análisis integral del patrimonio arquitectónico.

3.9 Conclusiones parciales capítulo 3

Los resultados obtenidos mediante el índice de Kappa demuestran la efectividad del modelo HBIM-SIG en el diagnóstico del deterioro del PA. La concordancia sustancial con los métodos tradicionales valida la precisión del modelo en categorías como desprendimientos y pérdida de material, lo que refuerza su viabilidad como herramienta confiable para aplicaciones prácticas. El análisis estadístico no solo asegura la solidez del modelo, sino que también respalda su utilidad en la integración de tecnologías avanzadas para mejorar el diagnóstico.

El análisis comparativo realizado en el capítulo identifica áreas en las que el modelo HBIM-SIG destaca y otras donde requiere optimización. Por ejemplo, mientras demuestra alta efectividad en el diagnóstico de desprendimientos, su desempeño en categorías como alteraciones cromáticas y depósitos superficiales enfrenta limitaciones derivadas de la dificultad para representar ciertos deterioros mediante datos fotográficos. Estas observaciones críticas permiten identificar mejoras en el modelado de los datos y refinamientos tecnológicos, estableciendo un camino claro para futuras investigaciones y aplicaciones.

El capítulo enfatiza el potencial práctico del modelo para la gestión del PA. Los mapas temáticos y las representaciones tridimensionales generadas mediante HBIM y SIG no solo identifican las áreas prioritarias de intervención, sino también facilitan la planificación de restauraciones más eficaces. Esta capacidad de vincular datos geométricos y ambientales en formatos visuales detallados lo convierte en una herramienta indispensable para los proyectos de conservación.

La propuesta consolidada en el capítulo reafirma el aporte innovador del modelo HBIM-SIG al combinar tecnologías modernas con enfoques tradicionales. Su capacidad de adaptarse a diferentes entornos y condiciones lo posiciona como una solución replicable y escalable para la preservación del patrimonio. Además, la integración de técnicas multicriterio en SIG añade un nivel adicional avanzado, optimizando la selección estratégica de recursos y acciones en proyectos de restauración.

La aplicación del modelo en la Facultad de Arte Teatral ha evidenciado cómo factores ambientales críticos como la humedad, la temperatura y el viento afectan

el deterioro de las edificaciones. La vinculación del modelo matemático con datos fotográficos ha permitido una representación precisa de las áreas afectadas, asegurando que las intervenciones se realicen con base en información técnica y confiable. El nivel de detalle garantiza una comprensión profunda de las condiciones actuales del inmueble, esencial para su conservación.

Aunque el modelo ha demostrado ser eficaz, se identifican limitaciones relacionadas con la calidad de los materiales y las diferencias en el mantenimiento de los bloques de la infraestructura. Estas áreas presentan oportunidades para optimizar el modelo mediante nuevas técnicas de recopilación de datos y análisis predictivo. El enfoque asegura que el modelo continúe evolucionando para abordar necesidades específicas del patrimonio arquitectónico.

El trabajo aborda las principales carencias de la integración SIG-HBIM mediante un modelo flexible que combina escalas urbanas y arquitectónicas a través de un ciclo iterativo. El enfoque ajusta datos climáticos generales a las condiciones específicas de las edificaciones, logrando diagnósticos detallados y ampliando su aplicabilidad a contextos más amplios. La capacidad de personalizar las bases de datos y variables ambientales asegura que la metodología sea replicable en distintos escenarios y tipos de PA. Además, el uso de herramientas interoperables y procesos de actualización continua refuerza su utilidad práctica y su potencial para ser generalizada en proyectos de conservación patrimonial a diferentes escalas.

CONCLUSIONES FINALES

1. La fundamentación teórico-metodológica adoptada en esta investigación ha demostrado ser efectiva para abordar el estudio del deterioro del PA en inmuebles patrimoniales. Las tecnologías empleadas, tales como los SIG y el HBIM, han proporcionado una base robusta para el análisis detallado y la monitorización de las condiciones de deterioro en los inmuebles. Estas herramientas permiten una integración de datos precisa y una representación visual que facilita la comprensión de los procesos de deterioro y las medidas necesarias para su conservación.
2. La generación de representaciones cartográficas y la modelación en el SIG de las variables ambientales del área de estudio han proporcionado una visión clara y detallada de las condiciones que afectan el deterioro del PA. El empleo de tecnologías avanzadas ha permitido la identificación de áreas críticas y la evaluación de factores ambientales con alta precisión, lo cual es esencial para desarrollar estrategias de conservación eficaces y bien fundamentadas.
3. El modelo propuesto en esta investigación, que vincula los SIG con los HBIM, ha demostrado ser una herramienta innovadora y eficaz para el análisis y la modelación de las variables ambientales que influyen en el deterioro del PA con valores patrimoniales. Esta integración permite un análisis más holístico y detallado, facilitando la identificación de patrones de deterioro y la propuesta de intervenciones específicas para la conservación de inmuebles patrimoniales.
4. La validación de los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo propuesto ha confirmado su eficacia y precisión en el estudio del deterioro del PA. Los resultados han sido consistentes con las observaciones empíricas y han permitido una evaluación detallada de las condiciones de deterioro en los inmuebles patrimoniales. Lo que destaca el potencial del modelo para ser utilizado como una herramienta estándar en la gestión y conservación del PA, proporcionando datos críticos para la toma de decisiones.

5. Las herramientas de análisis espacial y modelación presentes en los SIG posibilitan el análisis de la influencia de las variables ambientales la elaboración de un modelo matemático que permitió identificar las condiciones más favorables para la aparición de los deterioros estudiados en las paredes y muros de la instalación.
6. Los resultados de la comprobación del modelo propuesto informan que en sentido general los deterioros mejores diagnosticados según la índice kappa corresponden con el desprendimiento y la pérdida de material seguidos del ataque biológico, alteraciones cromáticas y los depósitos superficiales.

RECOMENDACIONES

1. Ampliar el rango de variables ambientales y materiales en el modelo, utilizando drones con cámaras térmicas y sensores ambientales para recopilar datos en tiempo real, e instalar estaciones meteorológicas automáticas para monitorear continuamente las condiciones del área de estudio. Esta integración mejorará la precisión y efectividad del diagnóstico del deterioro patrimonial.
2. Incorporar al modelo una base de datos más amplia y detallada que incluya otros materiales para realizar el diagnóstico en edificaciones híbridas e implementar el modelo propuesto a partir de los datos que se incorporen.
3. Crear un inventario exhaustivo que documente todas las labores de mantenimiento realizadas en los inmuebles patrimoniales, incluyendo fechas, calidad de los materiales utilizados y ubicación de las intervenciones, para tener un registro detallado de las acciones realizadas y su impacto en la conservación.
4. Realizar un monitoreo continuo de las condiciones ambientales y de los inmuebles utilizando los HBIM y los SIG para mantener el modelo actualizado y relevante, así como validar los resultados periódicamente mediante la comparación con datos empíricos y observaciones de campo para asegurar la precisión del diagnóstico y la eficacia del modelo.
5. Publicar los resultados de la investigación en revistas especializadas y presentar en congresos para compartir el conocimiento adquirido y fomentar su aplicación práctica en otros contextos y proyectos de conservación.
6. Optimizar la gestión documental mediante la integración de SIG y HBIM en una única plataforma, facilitando la documentación y gestión eficiente del PA, y reduciendo el tiempo y los recursos necesarios para estos procesos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alubuild. (2023). HBIM: digitalizando la conservación y restauración de edificios. <https://alubuild.com/es/que-es-hbim/>.
2. Antón García Tutora, D., Rosa Marrero Meléndez, M., Medjdoub, B., & Moyano Campos, J. J. (2019). Modelado de información y alteraciones geométricas para respaldar el análisis preciso de activos patrimoniales. *Tesis doctoral, Universidad de Sevilla*. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=245015>.
3. Autoridad del Centro Histórico de la Ciudad de México. (2022). Guía de buenas prácticas para intervenciones en edificios del Centro Histórico. Disponible en https://www.autoridadcentrohistorico.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Guia_de_Buenas_Practicas.pdf.
4. Avilés Garragate, N. A., Castillo Coronado, F. P., & Castro Imán, J. Y. (2020). Diseño estructural de una institución educativa mediante la metodología BIM en la ciudad de Piura, año 2019. Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez\ RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y>[(http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
6. Azkarate, A., Ruiz de Ael, M. J., & Santana, A. (2013). *El Patrimonio Arquitectónico*. Academia.edu. Recuperado de https://www.academia.edu/23729317/AZKARATE_A_RUIZ_DE_AEL_M_J_SANTANA_A_2013_El_Patrimonio_Arquitect%C3%B3nico.
7. Balletti, C., Guerra, F., Vernier, P., Studnicka, N., Riegl, J., & Orlandini, S. (2004). Practical comparative evaluation of an integrated hybrid sensor based on Photogrammetry and Laser Scanning for Architectural Representation. *The International Archives of the*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35 (B5), 736-741.

8. Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Oreni, D., Previtali, M., & Roncoroni, F. (2015). HBIM and augmented information: Towards a wider user community of image and range-based reconstructions. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 40*(5W7), 35–42. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-35-2015>.
9. Blanca, Y. L. U. Z., & Ntas, H. (2014). Los escáneres de barrido láser y la conservación del patrimonio. *Primer Congreso Internacional Patrimonio Cultural y Nuevas Tecnologías*. Recuperado de https://www.academia.edu/37504593/Los_esc%C3%A1ners_de_barrido_l%C3%A1ser_y_luz_blanca_Herramientas_para_la_conservaci%C3%B3n_del_patrimonio_material.
10. Blanco Diazgranados, M. A. (2018). Cambiando el chip en la construcción, dejando la metodología tradicional de diseño CAD para aventurarse a lo moderno de la metodología BIM. *Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil*. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/16606>.
11. Broto, C. (2006). Enciclopedia Broto de patologías de la construcción. Links International.
12. Brusaporci, S. (2017). Digital Innovations in Architectural Heritage Conservation: Emerging Research and Opportunities (Advances in Media, Entertainment, and the Arts) (1st ed.). IGI Global.
13. Bueno, J. A. (2022). Apuntes geotecnia VII. Nivel freático. Cimentaciones y excavación. Geotecnia Consultores. <https://www.geotecniaconsultores.com/apuntes-geotecnia-vii-nivel-freatico-cimentaciones-y-excavacion/>.

14. Buzai, G. D. (2013). Sistema de información geográfica (SIG): Teoría y aplicación. Lugar Editorial.
15. Cantos García, R. V. (2024). Análisis patológico en viviendas de interés social: urbanización "Zona Cero Ecuador Estratégico" Manta-Manabí. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. Disponible en <https://repositorio.ulead.edu.ec/handle/123456789/6888>.
16. Carreton, A. (2018). El Patrimonio Urbano - Patrimonio Inteligente. *Patrimonio Inteligente*. Recuperado de <https://patrimoniointeligente.com/patrimonio-urbano/>.
17. Castán, M. Q., & Hernández, L. A. (2022). Metodología de captura y procesamiento para el desarrollo de una base de datos gráfica 3D del patrimonio arquitectónico. *Ge-Conservación*, 21(1), 72-84. <https://doi.org/10.37558/gec.v21i1.1048>.
18. Castro, M. (2020). Mantos freáticos: características, cómo se forman, contaminación. *Lifeder*. Recuperado de <https://www.lifeder.com/mantos-freaticos/>.
19. Choclán, F., Soler, M., & González, R. (2015). Introducción a la metodología BIM. *Spanish Journal of Building Information Modeling*, 14(1), 4-10. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5413529>.
20. Choclán Gámez, F., Soler Severino, M., & González Márquez, R. J. (2015). Introducción a la metodología BIM. *Philosophy and Phenomenological Research*, 12*(4), 591. <https://doi.org/10.2307/2103629>.
21. Couceiro, M. C. (2021). Realidades Extendidas (XR). Evolución Cognitiva y Analogías Biológicas en la Comunicación Científica. *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación*, 149, 75-90. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8269188>.

22. De Ullibarri Galparsoro, L., & Pita Fernández, S. (1999). Medidas de concordancia: el índice de Kappa. **Cad Aten Primaria, 6**, 169-171.
<https://www.mvclinic.es/wp-content/uploads/López-de-Ullibarri-Medidas-de-concordancia-el-índice-Kappa.pdf#:~:text=El%20%C3%ADndice%20kappa%20representa%20una.>
23. Delgado Espinosa, A. A. (2014). Evaluación, diagnóstico estructural y propuesta de intervención en el edificio de vivienda Prado y Santa Elena. *Tesis de licenciatura, Universidad Central de las Villas, Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil*. Recuperado de <https://1library.co/document/yr3dwd8y-evaluacion-diagnostico-estructural-propuesta-intervencion-edificio-vivienda-prado.html>.
24. Domínguez, J., & González, A. (2015). Valoración técnica del deterioro de las edificaciones en la zona costera de Santa Fe. *Arquitectura y Urbanismo*. Disponible en https://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-58982015000100005.
25. EOS Data Analytics. (2024). Tecnologías geoespaciales: ejemplos y posibles aplicaciones. EOS Data Analytics. Recuperado de <https://eos.com/es/blog/tecnologias-geoespaciales/>.
26. Escudero, P. A. (2021). La gestión eficiente de los Bienes Patrimoniales mediante la aplicación de la metodología HBIM. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/174849>.
27. Flórez Traslaviña, C. A. (2022). Metodología de integración BIM-GIS para proyectos de Infraestructura, caso de estudio “alternativa de solución vial al sector “Pericongo” corredor vial Neiva – Santana – Mocoa. Tesis de licenciatura, Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/44998/FlorezTraslavi%C3%B1aCristianAndres2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- 28.Fonseca, C., Alpizar, M., Hernández, D., González, I., Cutié, V., Valderá, N., Barcia, S., Martínez, M., Gil, L., Vazquez, R., Rodríguez, R. M., Velázquez, B., & Pérez, R. (2020). Estado del Clima en Cuba 2019. Resumen ampliado. *Revista Cubana de Meteorología, 26 (4).
- 29.Franceschi, S., & Germani, L. (2021). *Il degrado dei materiali nell'edilizia. Cause e valutazioni delle patologie*. DEI. Recuperado de <https://www.amazon.it/degrado-materiali-nelledilizia-valutazioni-patologie/dp/8849618239>.
- 30.Franceschi, S., & Germani, L. (2024). *Manuale operativo per il restauro architettonico. Metodologie di intervento per il restauro y la conservación del patrimonio histórico*. DEI Tipografia del Genio Civile. Recuperado de https://books.google.com/books/about/Manuale_operativo_per_il_restaur_o_archit.html?id=5N2WRAAACAAJ.
- 31.Garcia Chavez, J. R., & Fuentes Freixanet, V. (2005). Viento y Arquitectura: El viento como factor de diseño Arquitectónico (3rd ed.). Trillas. <https://civilarg.com/libro/viento-y-arquitectura-el-viento-como-factor-de-diseno-arquitectonico-libro-pdf/>.
- 32.García, E. S., Jordan, I., Nieto, J. E., & Checa, A. M. (2018). Sustainable guardianship of cultural heritage through digital BIM and GIS models: contribution to knowledge and social innovation. Acronym: TUSOSMOD View project. <https://www.researchgate.net/publication/330183791>.
- 33.Guáitara López, A. V. (2014). Aplicación de realidad aumentada orientada a la publicidad de alto impacto en la empresa Vecova Cía. Ltda Tesis de licenciatura, Universidad Regional Autónoma de los Andes.
- 34.Gutiérrez, Y. (2016). Evaluación del nivel freático ante patologías de humedad en el centro histórico de la ciudad de Holguín. En Modelación numérica computacional del diseño de un vertedor de

pared delgada de sección compuesta. CD-ROM, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

- 35.HBIMSIGTUR. (s.f.). *Interoperabilidad entre HBIM y SIG para la planificación turística del patrimonio cultural*. Universitat Politècnica de València. Recuperado de <https://hbimsigtur.webs.upv.es/>.
- 36.Hernández León, R. A., & Coello González, Z. (2000). *El paradigma cuantitativo de la investigación científica*. Editorial Universitaria.
- 37.Hernández Peña, L. (2019). Procedimiento para modelado 3D de edificaciones a partir de nubes de puntos generadas por escáner láser terrestre. *X Congreso Internacional de Geomática 2018*. Recuperado de https://www.academia.edu/40877791/X_CONGRESO_INTERNACIONAL_DE_GEOM%C3%81TICA_2018_PROCEDIMIENTO_PARA_EL_TRABAJO_CON_LA_NUBE_DE_PUNTOS_DEL_ESC%C3%81NER_L%C3%81SER_UTILIZANDO_EL_SOFTWARE_CYCLONE_PROCEDURE_FOR_THE_WORK_WITH_THE_CLOUD_OF_POINTS_OF_THE_LASER_SCANNER_USING_THE_SOFTWARE_CYCLONE.
- 38.Hernández Peña, L. (2023). Modelación 3D de obras patrimoniales a partir de tecnología laser. **Revista cubana de geomática, 3*(1)*. Recuperado a partir de <https://geomatica.geocuba.cu/rcg/article/view/79>.
- 39.Hernández Peña, L. (2023). Tecnologías de la Geomática aplicadas a estudios geográficos, del medio ambiente y del Patrimonio Cultural Tangible. *Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio, 23(1)*. Recuperado de <https://www.iga.cu/vol23-no1-art6/>.
- 40.Hernández Peña L., Merlo, A., Remond Noa, R., Arencibia Iglesias, S. R., & Ricardo Desdín, S. E. (2024). Propuesta de un modelo HBIM-SIG para el diagnóstico de patologías en el patrimonio arquitectónico. *Loggia, Arquitectura & Restauración, 37*. <https://doi.org/10.4995/loggia.2024.21926>.

41. Herrera Fuentes, M. A. (2019). Estrategia para la rehabilitación estructural sustentable de edificios: Caso de estudio "Ten Cents", Cienfuegos. Ponencia presentada en el VII Simposio Internacional de Química 2019 (SIQ 2019) - VII Conferencia Ciencias Químicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Recuperado de <https://convencion.uclv.cu/es/event/vii-simposio-internacional-de-quimica-2019-siq-2019-vii-conferencia-ciencias-quimicas-27/track/estrategia-para-la-rehabilitacion-estructural-sustentable-de-edificios-2227>.
42. ICOMOS. (2003). Principios para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del patrimonio arquitectónico.
43. Idrovo, D., Jara, D., & Torres, G. (2012). Formulación de un plan de conservación preventiva para los bienes edificados, aplicado al Seminario San Luis y Calle Santa Ana. *Tesis de grado, Universidad de Cuenca, Facultad de Arquitectura y Urbanismo*. Recuperado de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/cbaa092c-6515-441a-b0c6-0ac3ebe47997>.
44. Iglesia, A., Luc, S., & Hidalgo, M. (2017). Interoperabilidad entre SIG y BIM aplicada al patrimonio arquitectónico: Exploración de posibilidades mediante la realización de un modelo digitalizado de la Antigua Iglesia de Santa Lucía y posterior análisis. *Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Arquitectura*. Recuperado de https://fama.us.es/discovery/fulldisplay/alma991012929399704987/34C_BUA_US:VU1.
45. Imasgal. (2020). Nivel de desarrollo (LOD) en BIM. In Nivel de desarrollo (LOD) en BIM (p. 1). <https://imasgal.com/nivel-desarrollo-bim-lod/>.
46. Imhof Verlag, M. (2014). *European illustrated glossary of conservation terms for wall paintings and architectural surfaces*. En Weyer, A., Roig

- Picazo, P., Pop, D., Cassar, J., Özköse, A., Vallet, J.-M., & Srša, I. (Eds.), *Paper Knowledge. Toward a Media History of Documents* (pp. 1-448). Michael Imhof Verlag. Recuperado de <https://openarchive.icomos.org/1706/>.
47. Jouan, P., & Hallot, P. (2019). Digital Twin: A HBIM-Based Methodology to Support Preventive Conservation of Historic Assets Through Heritage Significance Awareness. *ISPRS Archives*. Disponible en <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-2-W15/609/2019/>.
48. León Nieto, J. A. (2020). Un acercamiento a los procesos de automatización en el patrimonio constructivo: El caso de la fachada de la Casa de Pilatos; Sevilla. Tesis de maestría, Universidad de Sevilla. <https://hdl.handle.net/11441/104379>.
49. Liébana, O., & Gómez Navarro, M. (2015). Normalización del nivel de desarrollo de modelos S-BIM. *Resúmenes de comunicaciones, 2014*, ISBN 978-84-89670-80-8, págs. 163-164. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Oscar-Liebana/publication/271325591_NORMALIZACION_DEL_NIVEL_DE_DESARROLLO_DE_MODELOS_S-BIM/links/54c501ac0cf219bbe4f1c2da/NORMALIZACION-DEL-NIVEL-DE-DESARROLLO-DE-MODELOS-S-BIM.pdf.
50. Linet, B. B. (2019). Empleo del escáner láser 3D para la realización de levantamientos de fachada. Tesis de licenciatura, Academia Naval “Granma”.
51. López, F. J. (2018). Reconstrucción tridimensional del patrimonio arquitectónico mediante la utilización de los sistemas BIM y HBIM. Validación con dos casos de estudio: la iglesia Santa María la real de mave y el castillo de los comuneros de torrelobatón. Tesis doctoral, Universidad de Valladolid.

52. López-González, C., & García-Valdecabres, J. (2023). The integration of HBIM-SIG in the development of a virtual itinerary in a historical centre. *Sustainability*, 15, 13931. <https://doi.org/10.3390/su151813931>
53. López Sorzano, M. C., García Schiller, C., & Serpa Isaza, E. (2005). Manual para inventarios de bienes culturales muebles.
54. Lucero, P. I. (2022). El mapa social de Mar del Plata. Una TomoGeografía Computarizada de las desigualdades territoriales contemporáneas. *Portal Universidad*. Disponible en <https://repositorio.ungs.edu.ar:8080/bitstream/handle/UNGS/1623/mapa%20social.pdf?sequence=1>.
55. Maltseva, I., Meng, T., Xiao, S., Cao, Y., & Zeng, L. (2024). An integrated review and analysis of urban building seismic disaster management based on BIM-GIS. *E3S Web of Conferences*, 474. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202447402013>.
56. Manuel, A., & Salazar, F. (2017). Impacto económico del uso de BIM en el desarrollo de construcción en la ciudad de Manizales. *Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Construcción*. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/59461/manuelfernandosalazaralzate.2017.pdf?sequence=1>.
57. María, J., Vega, G., Fornos, R. A., & Román, M. C. (2022). Modelo digital de información para la gestión del conjunto arqueológico de Itálica. Necesidades y estrategias. *Más allá de las líneas. La gráfica y sus usos: XIX Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica*, 475-478. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8612438>.
58. Marino, B. M., Muñoz, N., & Thomas, L. P. (2020). Correlación entre el comportamiento térmico de muros y las características climáticas del sitio de construcción. **Asades, 24*, 19–30.*

https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/143498/CONICET_Digital_Nro.97d4eada-2519-42e5-ab7b-912a4fca2a7d_A.pdf?sequence=2.

59. Martínez Villa, M. (2018). Modelado BIM del patrimonio arquitectónico para la intervención: El teatro romano de Sagunto. Tesis de maestría, Universidad de Sevilla.
60. Mendoza, G., Murillo, G., & Suarez, D. (2020). La influencia del ambiente en el deterioro de las edificaciones. *ResearchGate*. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Gessenia-Murillo-Mendoza-2/publication/343268661_LA_INFLUENCIA_DEL_AMBIENTE_EN_EL_DETERIORO_DE_LAS_EDIFICACIONES/links/5f20abb3299bf1720d6da862/LA-INFLUENCIA-DEL-AMBIENTE-EN-EL-DETERIORO-DE-LAS-EDIFICACIONES.pdf.
61. Merlo, A., & Aliperta, A. (2015). *Levantamiento digital y modelación 3D*. Universidad de Florencia, Departamento de Arquitectura. Recuperado de https://issuu.com/dida-unifi/docs/levantamiento_digital.
62. Merlo, A., & Feliciano Valenciaga, Y. (Eds.). (2023). ¡Que no baje el telón! Proyecto de restauración y rehabilitación de la Facultad de Arte Teatral del ISA. Florencia-La Habana: didapress-Ediciones Cúpulas. <https://didapress.it/publicazione/que-no-baje-el-telon>.
63. Mesanza Moraza, A. (2011). Técnicas no destructivas aplicadas al patrimonio construido. Tesis de maestría, Universidad de Salamanca.
64. Miquel, J., & Tarongers, B. (2008). Teoría y práctica del escaneado láser terrestre: Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas. *Proyecto 3DRiskMapping, Leonardo Da Vinci Programme*. Recuperado de <https://studylib.es/doc/6247073/teor%C3%ADa-y-pr%C3%A1ctica-del-escaneado-l%C3%A1ser-terrestre>.
65. Molero, M. del M., Barragán, A. B., Simón, M. del M., & Martos, Á. (2022). Innovación Docente e Investigación en Arte y Humanidades: Experiencias de cambio en la Metodología Docente. *IV Congreso*

Internacional de Innovación Docente e Investigación en Educación Superior CIVICO. Editorial Dykinson. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=882129>.

66. Montagna, A., & Pachiana, G. (n.d.). Modelado 3D de sitios históricos Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Sur.
67. Montañez Chaparro, F. L., & Rincón Garzón, J. A. (2015). La geomática: definición, características, objeto y método de estudio. Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
68. Montero Vilar, P. (2023). Tecnologías SIG y HBIM aplicadas a la gestión de riesgos y emergencias en patrimonio cultural. En L. Toro Murillo, A. Gómez Morón & P. Ortiz Calderón (Coords.), *Análisis de riesgos y respuestas ante emergencias en patrimonio cultural* (pp. 215-241). Consejería de Turismo, Cultura y Deporte, Junta de Andalucía. Recuperado de <https://docta.ucm.es/entities/publication/162c8ed3-2e0a-4115-a211-6528d8b73eb4>.
69. Navas, M. G. (2018). BIM DATA: La gestión de datos del BIM. *Alzada*, 116, 54–57. Recuperado de <https://riarte.es/handle/20.500.12251/638>.
70. Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. *Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf.
71. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2005). Asamblea General de los Estados Partes en la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural. París, Francia: UNESCO.
72. Paradiso, M. (2016). *Las escuelas nacionales de arte de La Habana: Pasado, presente y futuro*. DIDA Ricerche, Universidad de Florencia. Recuperado de https://issuu.com/dida-unifi/docs/paradiso_issu.

73. Patiño, L. R. (2012). Patología del ladrillo en fachadas causada por agentes atmosféricos. Estudio de caso ciudad de Bogotá. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia.
74. Piles Navarro, B. (2016). Impacto del BIM en la gestión del proyecto y la obra de arquitectura: Un proyecto utilizando REVIT. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia.
75. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2023). Informe Anual 2023. PNUD. Disponible en <https://annualreport.undp.org/2023/es/index.html>.
76. Ramírez, A. (2014). Lógica fuzzy, verdad y cognición. Cuadernos de Administración, 27(49), 69-92.
77. Ramírez, J. A. (2018). Comparación entre metodologías Building Information Modeling (BIM) y metodologías tradicionales en el cálculo de cantidades de obra y elaboración de presupuestos. Caso de estudio: edificación educativa en Colombia. Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia. <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/82671559/RamirezLeonJorgeAndres2018-libre.pdf?1648234172=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DComparacion+entre+Metodologias+Building.pdf&Expires=1708891890&Signature=CEa0O5kVqMPerVL26zn6S~5p8-uk940LIFPW>.
78. Remond, R., Música Aguilar, K., Alfonso-Álvarez, C., & Martínez Murillo, J. F. (2018). Influencia de fenómenos meteorológicos y variables geográficas en el deterioro del Malecón habanero (La Habana, Cuba). Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles, 77, 256–282. <https://doi.org/10.21138/bage.2541>.
79. Render - Rendering - Renderizado. (2020). 3D CAD Portal. <https://www.3dcadportal.com/rendering.html>.

80. Rigol, I., & Rojas, Á. (2012). *Conservación patrimonial: teoría y crítica*. Editorial UH, Universidad de La Habana. Recuperado de <https://docslib.org/doc/2307432/conservaci%C3%B3n-patrimonial-teor%C3%ADa-y-cr%C3%ADtica-isabel-rigol-%C3%A1ngela-rojas>.
81. Rodrigo, A., & Monk, F. (2004). Diseño y aplicación de métodos para evaluar patologías constructivas en el hábitat rural. *Revista INVI*, 19(51), 108-127. Recuperado de <https://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/download/62280/65919/>.
82. Rodrigo Ramos, A., Rotondaro, R., & Felipe, M. (2004). Diseño y Aplicación de Métodos para Evaluar Patologías Constructivas en el Hábitat Rural. *Arquitectura de Tierra en el Noroeste Argentino*. *Revista INVI*, 19, 108–127. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=25805108>.
83. Statologos. (2025). Guía práctica para calcular el Kappa de Cohen en 5 sencillos pasos. *Statologos*. Recuperado de <https://statologos.com/calculadora-de-cohens-kappa/>
84. ScienceAQ. (2020). ¿Qué causa la erosión de la piedra caliza? Disponible en <https://es.scienceaq.com/Geology/1003313113.html>.
85. UNESCO. (1974). Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural. *Revista del Patrimonio Mundial*, 74, 72 p. Recuperado de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000231678_spa.
86. Viñals Blasco, M. J. (2021). Análisis y desarrollo de la integración HBIM en SIG para la creación de un protocolo de planificación turística del patrimonio cultural de un destino. *Universitat Politècnica de València*. Disponible en <https://hbimsigtur.webs.upv.es/>.
87. Yibo, Y. (2009). Procedimiento para el diagnóstico de valores culturales tangibles e intangibles, en el destino turístico de la ciudad de Zibo

provincia de Shandong. Tesis de doctorado, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

88. Yuste, M. (2019). BIM: Concepto, historia, tecnologías y alcance. *EADIC*. <https://www.eadic.com/bim-concepto-historia-tecnologias-y-alcance/>.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abbate, E., Invernizzi, S., & Spanò, A. (2020). HBIM parametric modelling from clouds to perform structural analyses based on finite elements: A case study on a parabolic concrete vault. *Applied Geomatics*, 14(1), 79–96. <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00341-4>.
2. About the American Society for Nondestructive Testing. (s.f.). Recuperado el 4 de agosto de 2021, de <https://www.asnt.org/MajorSiteSections/About.aspx>.
3. Abraira, V., & Pita Fernández, S. (2000). Medidas de concordancia: el índice Kappa. *Revista Española de Cardiología*, 53(2), 125-130. <https://doi.org/10.xxxx/xxxx>.
4. Alubuild. (2023). HBIM: Digitalizando la conservación y restauración de edificios. <https://alubuild.com/es/que-es-hbim/>.
5. Alzaga Sáez, P. (2018). Desarrollo e implementación de assets modulares y props mediante Blender [Tesis de grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación]. Repositorio UPM. http://oa.upm.es/54103/1/TFG_PABLO_ALZAGA_SAEZ.pdf.
6. Autodesk. (2019). Integración de BIM y GIS. <https://www.autodesk.es/solutions/bim/explore-civil-infrastructure/bim-gis-ebook/thank-you>.
7. Autodesk. (2020a). Diseña y construye con BIM, Modelado de información de edificios. ¿Qué es BIM? <https://www.autodesk.com/solutions/bim>.
8. Autodesk. (2020b). Qué es BIM. Modelado de información de construcción. <https://www.autodesk.com/solutions/bim>.
9. Autodesk. (2021). What Is BIM | Building Information Modeling | Autodesk. <https://www.autodesk.com/solutions/bim>.
10. Baik, A., Yaagoubi, R., & Boehm, J. (2020). Integration of HBIM and GIS for heritage building conservation. *Remote Sensing*, 12(9), 1465. <https://doi.org/10.3390/rs12091465>.
11. Bruno, N., Rechichi, F., Achille, C., Zerbi, A., Roncella, R., & Fassi, F. (2020). Integration of historical GIS data in a HBIM system. *ISPRS Archives, XLIII-B4*, 427-434. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B4-2020/427/2020/isprs-archives-XLIII-B4-2020-427-2020.pdf>.

12. Colucci, E., De Ruvo, V., Lingua, A., Matrone, F., & Rizzo, G. (2020). HBIM-GIS integration: From IFC to CityGML standard for damaged cultural heritage in a multiscale 3D GIS. *Applied Sciences*, 10(4), 1356. <https://doi.org/10.3390/app10041356>.
13. Dore, C., & Murphy, M. (2017). Current state and future directions of HBIM for digital documentation and management of heritage buildings. *Journal of Information Technology in Construction*, 22, 247-265. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2017.015>.
14. El-Dairi, M., & House, R. J. (2019). Optic nerve hypoplasia. En *Handbook of Pediatric Retinal OCT and the Eye-Brain Connection* (pp. 285–287). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-60984-5.00062-7>.
15. Escudero, P. A. (2021). La gestión eficiente de los Bienes Patrimoniales mediante la aplicación de la metodología HBIM. El caso de la Iglesia de San Lorenzo en Valencia [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. <http://hdl.handle.net/10251/174849>.
16. Fassi, F., Achille, C., & Mandelli, A. (2016). HBIM and augmented reality for cultural heritage. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5, 857-864. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-857-2016>.
17. Fernandes Dionizio, R., & Dezen-Kempter, E. (2024). HBIM-GIS integration: From blueprints to metadata for managing contemporary architectural heritage in a multiscale 3D GIS. *Springer Tracts in Civil Engineering*, 71-90. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61245-9_4.
18. Flórez Traslaviña, C. A. (2022). Metodología de integración BIM-GIS para proyectos de Infraestructura, caso de estudio “alternativa de solución vial al sector ‘Pericongo’ corredor vial Neiva – Santana - Mocoa [Tesis de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/44998/FlorezTraslaviñaCristianAndres2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
19. Fonseca, C., Alpizar, M., Hernández, D., González, I., Cutié, V., Valderá, N., Barcia, S., Martínez, M., Gil, L., Vazquez, R., Rodríguez, R. M., Velázquez, B., & Pérez, R. (2020). Estado del Clima en Cuba 2019. Resumen ampliado. *Revista Cubana de Meteorología*, 26(4).
20. Garagnani, S., & Manferdini, A. M. (2013). HBIM for conservation and management of built heritage: Towards a library of parametric objects. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial*

Information Sciences, II-5/W1, 93-100. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-93-2013>.

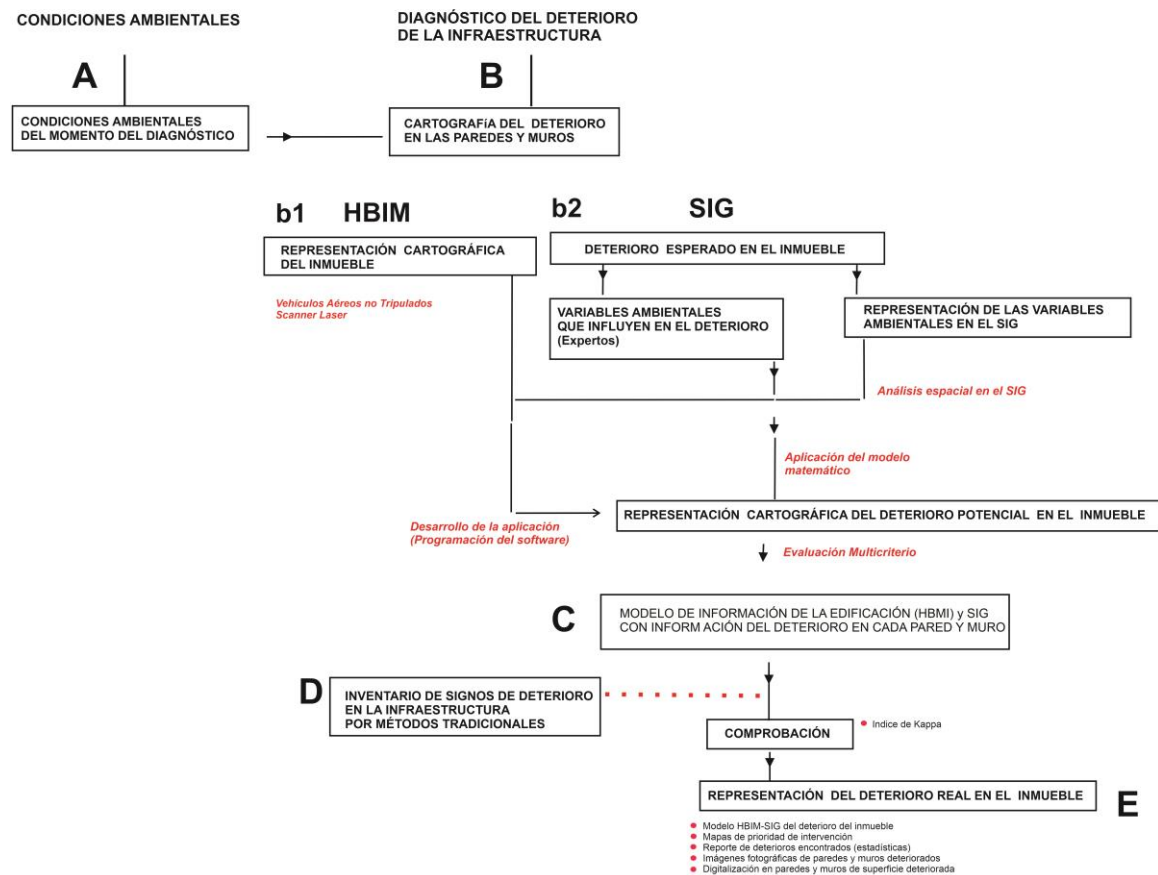
21. García Cuetos, P. (2012). El patrimonio cultural. Conceptos básicos (1.^a ed.). Prensas Universitarias de Zaragoza. <https://www.oaxaca.gob.mx/inpac/wp-content/uploads/sites/17/2019/08/Referencia-bibliográfica-sobre-conceptos-básicos-de-Conservación-del-Patrimonio.pdf>.
22. García González, J. R., & Sánchez Sánchez, P. A. (2021). Theoretical design of research: Methodological instructions for the development of scientific research proposals and projects. *Informacion Tecnologica*, 31(6), 159–170. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000600159>.
23. García, J. L., Viñals, M. J., & López, M. C. (2021). La utilización de herramientas tecnológicas en la gestión turístico-territorial del patrimonio cultural. Estado de la cuestión de la implementación SIG y BIM. *EUBIM*, 10. <https://hbimsigtur.webs.upv.es/wp-content/uploads/2022/04/r-at1-vinals-balsco-eubim-literatura-cientifica.pdf>.
24. Guevara Ortiz, E., & CENAPRED. (2020). Gestión Integral de Riesgos de desastres. Nueva visión de la protección civil (pp. 1–45). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/533466/Presentacion2_Curso_GIRD-ENAPROC.pdf.
25. Hallot, P. J. P. (2019). Digital twin: A HBIM-based methodology to support preventive conservation of historic assets through heritage significance awareness. Art Archaeology and Heritage Research Unit, LNA-DIVA, Université de Liège. <https://www.researchgate.net/publication/335410009>.
26. Herráez, B. J., & Vendrell, E. (2018b). Segmentación de mallas 3D de edificios históricos para levantamiento arquitectónico. *Virtual Archaeology Review*, 9(18), 66–76. <https://doi.org/10.4995/var.2018.5858>.
27. IFRC. (2024). ¿Qué es un desastre? Recuperado de <https://www.ifrc.org/es/nuestro-trabajo/desastres-clima-y-crisis/que-es-desastre>.
28. Imasgal. (2020). Nivel de desarrollo (LOD) en BIM (p. 1). <https://imasgal.com/nivel-desarrollo-bim-lod/>.
29. Jouan, P., & Hallot, P. (2019c). Digital twin: A HBIM-based methodology to support preventive conservation of historic assets through heritage significance awareness. *International Archives of the Photogrammetry*,

- Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 42(2/W15), 609–615. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-609-2019>.
30. Landa, M. (2023). Nuevas aportaciones a la diferenciación geográfica de los zócalos pintados andalusíes. *Loggia, Arquitectura & Restauración*, 36, 40–51. Recuperado de Loggia UPV <https://doi.org/10.4995/loggia.2023.19969>.
31. Leica Geosystems. (2022). Familia Leica TruView. HEXAGON. <https://leica-geosystems.com/es-es/products/laser-scanners/software/leica-truview>.
32. Logothetis, S., Karachaliou, E., & Stylianidis, E. (2015). Building information modelling for cultural heritage: A review. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W3, 343–348. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-343-2015>.
33. López-González, C., & García-Valdecabres, J. (2023). The Integration of HBIM-SIG in the Development of a Virtual Itinerary in a Historical Centre. *Sustainability*, 15, 13931. <https://doi.org/10.3390/su151813931>.
34. López-Manzanares, F. V., Mileto, C., & Solís, V. M. C. (2017). El arquitecto Rafael Guastavino (1842-1908): Obra en cuatro actos. *Ars Longa*, 26, 209–230. <https://doi.org/10.7203/arslonga.26.10964>.
35. Meseguer, L., & Garcia Valdecabres, J. (2023). Digital Twins. HBIM information repositories to centralize knowledge and interdisciplinary management of architectural heritage. *VITRUVIO International Journal of Architectural Technology and Sustainability*, 8, 64–75. <https://www.researchgate.net/publication/376730926>.
36. Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, 31(3), 148–161. <https://doi.org/10.1108/SS-02-2013-0012>.
37. Oreni, D., Brumana, R., Georgopoulos, A., & Cuca, B. (2014). HBIM for conservation and management of built heritage: Towards a library of parametric objects. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W1, 93–100. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-93-2014>.

ANEXOS

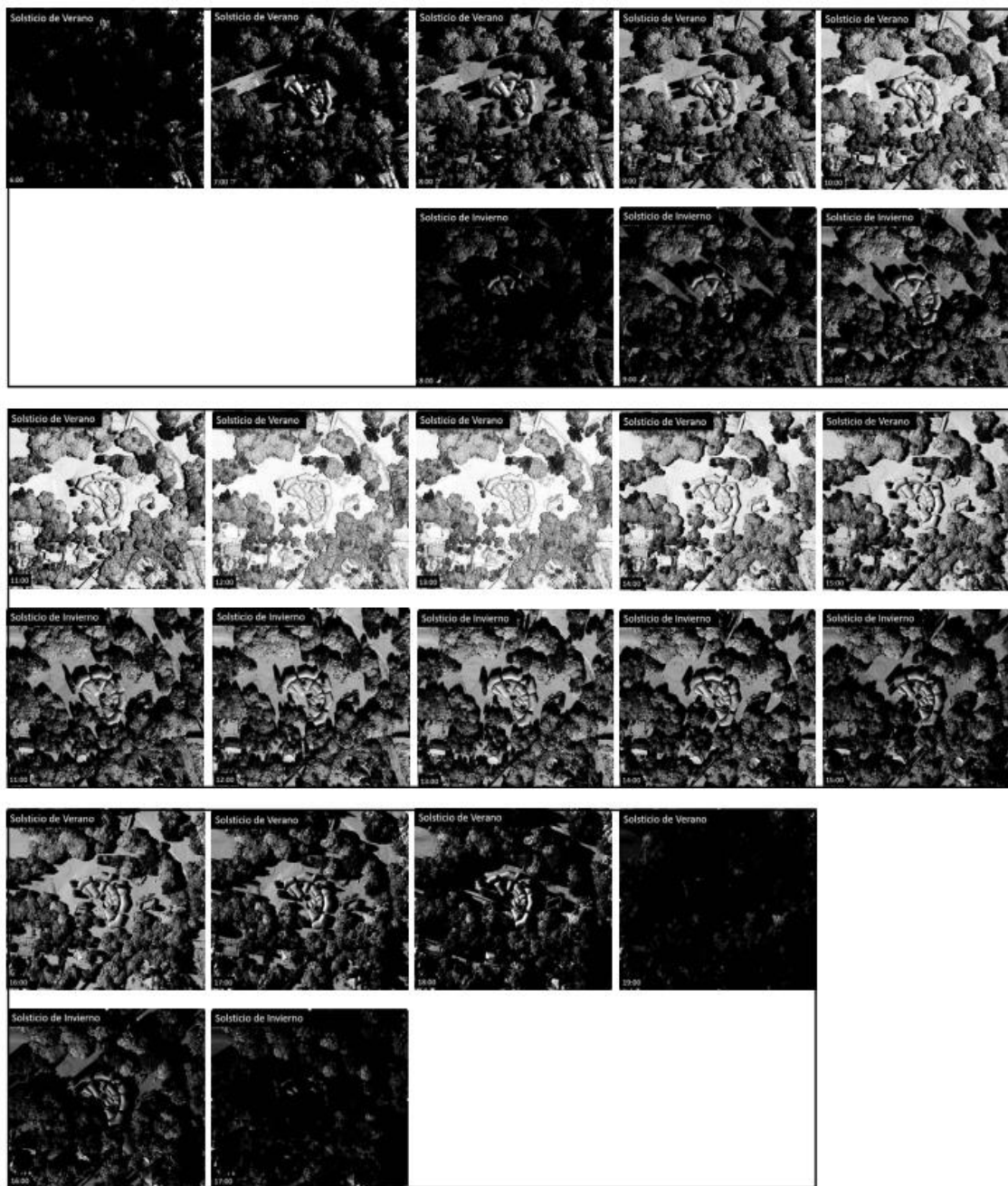
ANEXO 1: Esquema general simplificado.

MODELO HBIM-SIG PARA EL DIAGNÓSTICO DEL DETERIORO DE INMUEBLES PATRIMONIALES



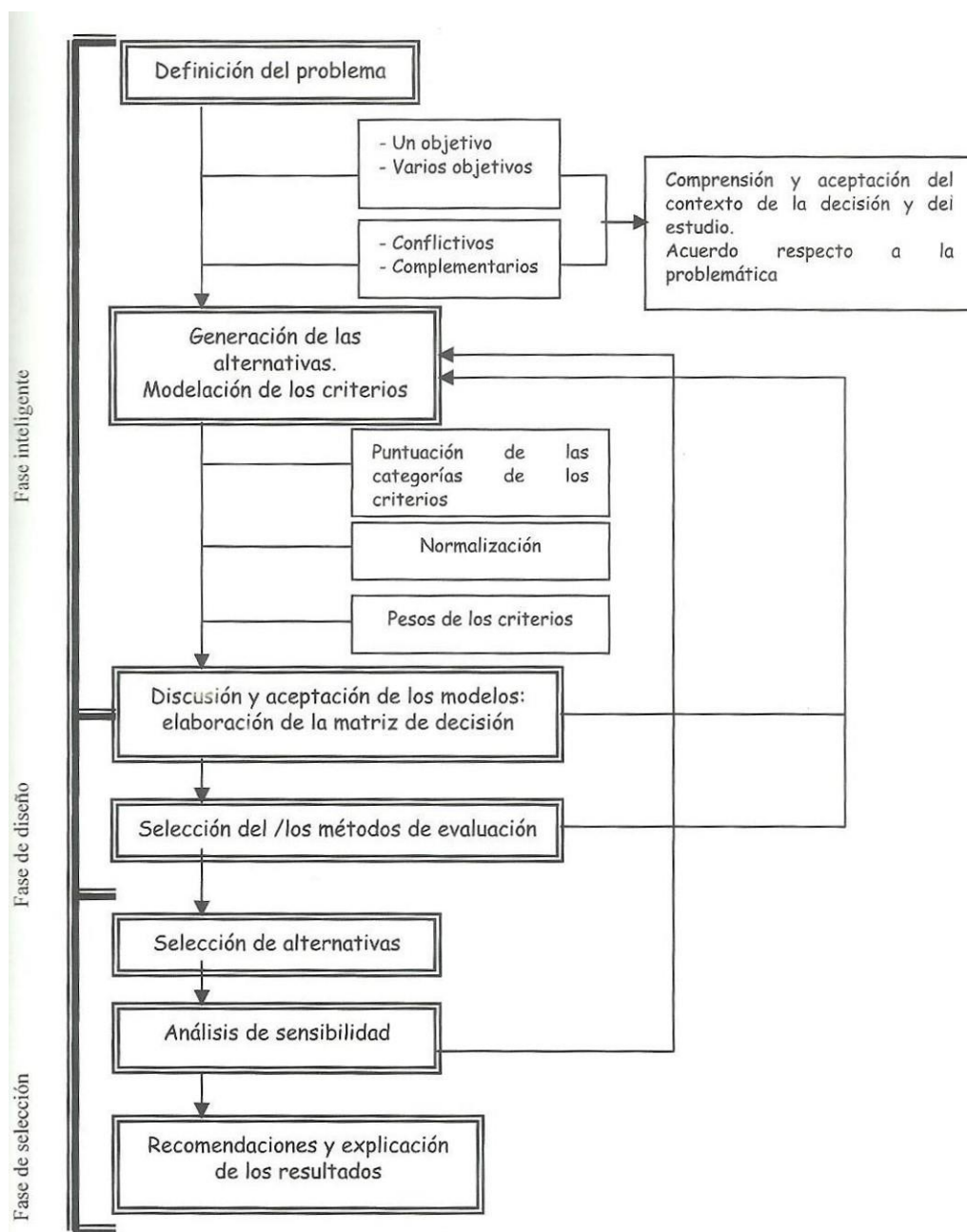
Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 2: Modelación del comportamiento de la radiación solar en el área de estudio en el solsticio de verano y solsticio de invierno.



Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 3: Etapas para el empleo de las técnicas de EMC en los SIG.



Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 4: Matriz en Excel resultado del Modelo Matemático.

Factores ambientales	Pátina	Alteración cromática	Pérdida de material	Depósitos Superficiales	Desprend.
Humedad	Muy Alto	Alto	Medio	Leve	Medio
Temperatura	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Medio
Acción Eólica	Leve	Bajo	Medio	Leve	Medio
Exposición Solar	Medio	Medio	Leve	Alto	Leve
Cercanía al Manto Freático	Muy Alto	Alto	Medio	Leve	Medio

1. Valoración cualitativa simple de los expertos de los impactos de los factores ambientales sobre los deterioros.

Factores ambientales	Pátina	Alteración cromática	Pérdida de material	Depósitos Superficiales	Desprend.
Humedad	0.6	0.45	0.3	0.15	0.3
Temperatura	0.3	0.05	0.3	0.05	0.3
Acción Eólica	0.15	0.05	0.3	0.15	0.3
Exposición Solar	0.3	0.3	0.5	0.45	0.15
Cercanía al Manto Freático	0.6	0.45	0.3	0.15	0.3

2. Representación numérica de la Importancia de los factores ambientales sobre los deterioros, que presentan en la tabla 1.

Factores ambientales	Pátina	Alteración cromática	Pérdida de material	Depósitos Superficiales	Desprend.
Humedad	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente
Temperatura	Decreciente	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente
Acción Eólica	Decreciente	Decreciente	Creciente	Decreciente	Creciente
Exposición Solar	Decreciente	Creciente	Creciente	Decreciente	Creciente
Cercanía al Manto Freático	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente

3. Sentidos de la correlación entre las mediciones de los factores ambientales y los deterioros según los expertos.

Factores ambientales	Pátina	Alteración cromática	Pérdida de material	Depósitos Superficiales	Desprend.
Humedad Alta	Creciente (0.45)	Creciente (0.45)	Creciente (0.45)	Creciente (0.45)	Creciente (0.45)
Temperatura Media	Decreciente (0.3)	Creciente (0.3)	Creciente (0.3)	Creciente (0.3)	Creciente (0.3)
Acción Eólica Leve	Decreciente (0.45)	Decreciente (0.45)	Creciente (0.15)	Decreciente (0.45)	Creciente (0.15)
Exposición Solar baja	Decreciente (0.6)	Creciente (0.05)	Creciente (0.05)	Decreciente (0.6)	Creciente (0.05)
Cercanía al Manto Freático alta	Decreciente (0.15)	Decreciente (0.15)	Decreciente (0.15)	Decreciente (0.15)	Decreciente (0.15)

4. Ejemplos de la Importancia de la medición de los factores ambientales en una pared de ladrillos, tomando en cuenta el sentido de la correlación y la escala ordinal de la medición de los factores ambientales medidos.

Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 4: Matriz en Excel resultado del Modelo Matemático.

Factores ambientales	Pátina	Alteración cromática	Pérdida de material	Depósitos Superficiales	Desprend.
Humedad	Muy Alto/ Creciente	Alto/ Creciente	Medio/ Creciente	Leve/ Creciente	Medio/ Creciente
Temperatura	Medio/ Decreciente	Bajo/ Creciente	Medio/ Creciente	Bajo/ Creciente	Medio/ Creciente
Acción Eólica	Leve/ Decreciente	Bajo/ Decreciente	Medio/ Creciente	Leve/ Decreciente	Medio/ Creciente
Exposición Solar	Medio/ Decreciente	Medio/ Creciente	Leve/ Creciente	Alto/ Decreciente	Leve/ Creciente
Cercanía al Manto Freático	Muy Alto/ Decreciente	Alto/ Decreciente	Medio/ Decreciente	Leve/ Decreciente	Medio/ Decreciente

5. Descripción de la matriz de relación causa-efecto. Cada elemento toma en cuenta la valoración cualitativa de la importancia a priori del factor ambiental y el sentido de la correlación de la medición.

Factores ambientales	Pátina	Alteración cromática	Pérdida de material	Depósitos Superficiales	Desprendimientos	Total
Humedad Alta	0.27	0.20	0.13	0.06	0.13	0.79
Temperatura Media	0.09	0.01	0.09	0.01	0.09	0.29
Acción Eólica Baja	0.03	0.03	0.01	0.09	0.01	0.17
Exposición Solar Alta	0.04	0.18	0.09	0.06	0.09	0.46
Total	0.43	0.42	0.32	0.19	0.32	

6. Matriz de Impactos de las mediciones de los factores ambientales.

Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 5: Listado de expertos

EXPERTOS	OCUPACIÓN
Alessandro Merlo	Profesor titular, Arquitecto, DrC. Universidad de Estudios de Florencia.
Stefania Franceschi	Arquitecto, Universidad de Estudios de Florencia.
Leonardo Germani	Arquitecto, DrC. Universidad de Estudios de Florencia.
Carlos Biangini	Arquitecto, DrC. Universidad de Estudios de Florencia.
Michele Paradiso	Arquitecto, DrC. Universidad de Estudios de Florencia.
Sergio Raymant Arencibia Iglesias	Decano Colegio San Gerónimo. Arquitecto. Universidad de La Habana.
Rafael Salas Trujillo	Especialista Principal Centro de Servicios científico-técnicos - DEMA. Empresa GEODESA. Máster en Ciencias en Ingeniería Ambiental.
Geosvany Méndez Gutiérrez	Director de Centro de Servicios científico-técnicos - DEMA. Empresa GEODESA. Ingeniero Geólogo.

Fuente: Elaborada por la autora.

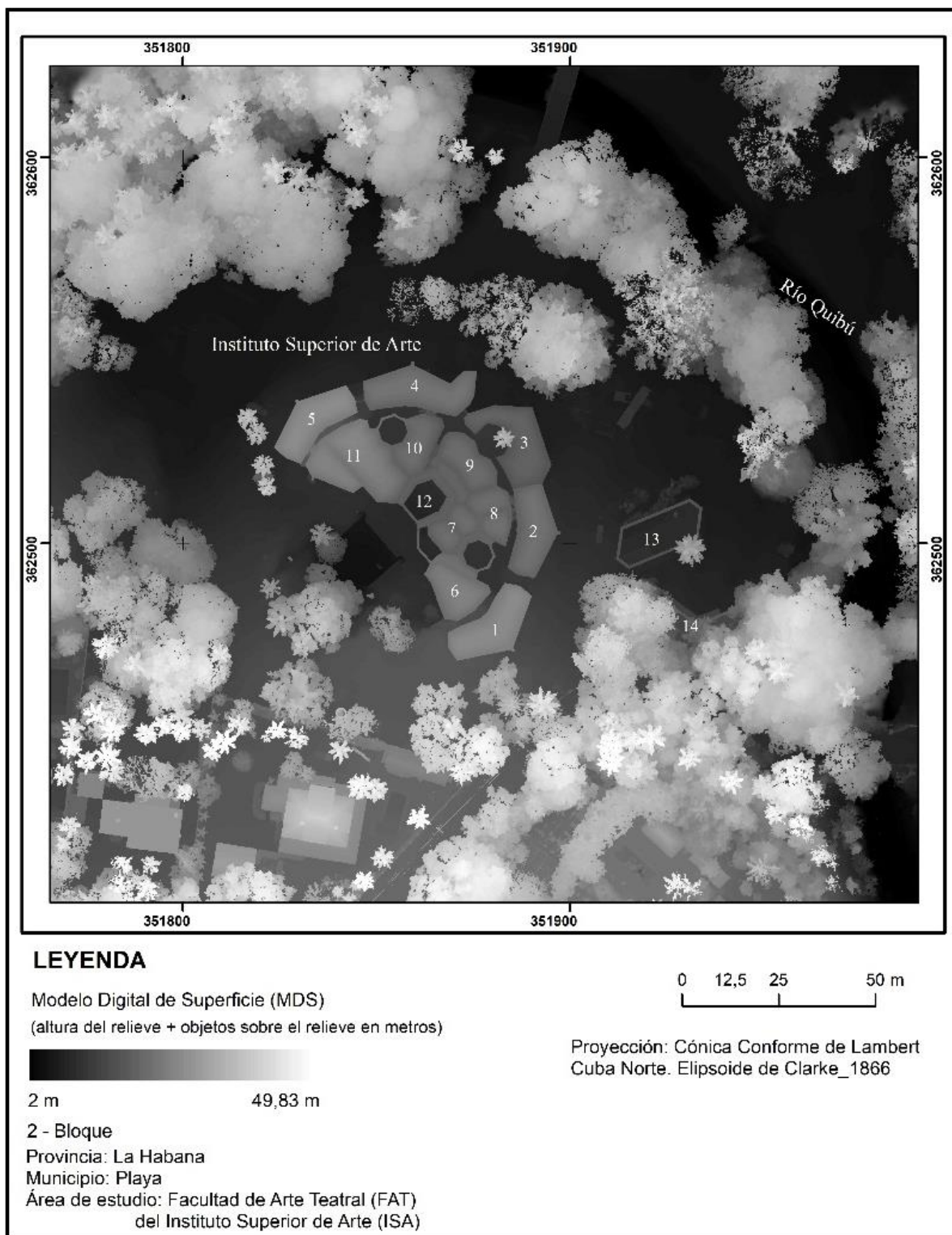
ANEXO 6: Inventario por métodos tradicionales

No	muros totales	Degradación Antrópica			Desprendimiento				Pérdida de Material			
		Degradación Antrópica	Grafitis	Adición- Agregación incompatible	Abolsamiento	Desprendimiento	Disgregación	Pulverización	Erosión	Cortes/ incisión	Pérdida de material	Perforación
Bloque 1	48	30	7	21	0	2	37	2	10	0	23	2
Bloque 2	38	20	8	9	0	0	25	1	1	0	10	1
Bloque 3	39	12	8	23	0	0	28	0	24	0	9	9
Bloque 4	102	28	11	31	0	17	23	12	13	0	7	0
Bloque 5	83	13	12	10	2	2	16	2	16	0	6	0
Bloque 6	32	2	5	18	0	0	22	12	0	0	10	0
Bloque 7	69	19	2	7	0	0	26	2	2	0	3	0
Bloque 8	26	5	3	4	0	0	17	2	5	0	8	4
Bloque 9	31	9	7	18	0	0	10	6	4	0	7	3
Bloque 10	42	9	4	11	0	2	31	0	4	0	1	0
Bloque 11	67	19	2	17	0	1	35	0	12	0	3	0
Bloque 12	22	4	2	9	0	0	8	2	4	0	0	0
Bloque 13	16	8	0	4	0	0	11	0	8	0	7	2
Bloque 14	52	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
TOTAL	667	179	71	182	2	24	289	42	103	0	95	21

No	Alteración Cromática y Depósito										Colonización Biológica		Fisura y Deformación		
	Depósito superficial	Alteración cromática	Mancha de humedad	Mancha	Eflorescencia	Concreción	Film- Película	Pátina de óxido de hierro	Coladura	Humedad ascendente	Colonización biológica/ Ataque biológico	Vegetación	Grieta	Fisura	Deformación
Bloque 1	2	0	1	11	14	0	32	0	25	1	31	0	2	4	0
Bloque 2	28	0	1	1	12	0	8	1	14	0	19	4	3	0	12
Bloque 3	16	0	0	6	15	0	18	1	10	0	16	2	5	0	0
Bloque 4	34	4	12	4	34	2	38	0	18	0	40	2	2	0	4
Bloque 5	41	0	4	0	14	0	12	0	9	0	9	4	5	0	17
Bloque 6	15	0	0	5	12	0	7	0	7	0	23	9	0	0	8
Bloque 7	4	0	1	8	18	0	21	0	13	0	19	4	0	0	5
Bloque 8	13	0	0	9	10	0	11	0	13	0	7	0	1	0	3
Bloque 9	27	0	0	5	11	0	10	0	9	0	10	1	1	0	0
Bloque 10	16	1	0	3	5	0	16	0	6	0	15	9	2	0	12
Bloque 11	25	0	0	7	19	0	8	1	14	1	30	2	8	0	7
Bloque 12	10	8	0	2	9	0	7	0	10	0	7	2	1	0	0
Bloque 13	1	0	4	4	0	0	0	0	4	0	10	5	6	0	0
Bloque 14	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
TOTAL	232	13	24	65	173	2	188	3	152	2	237	44	36	4	68

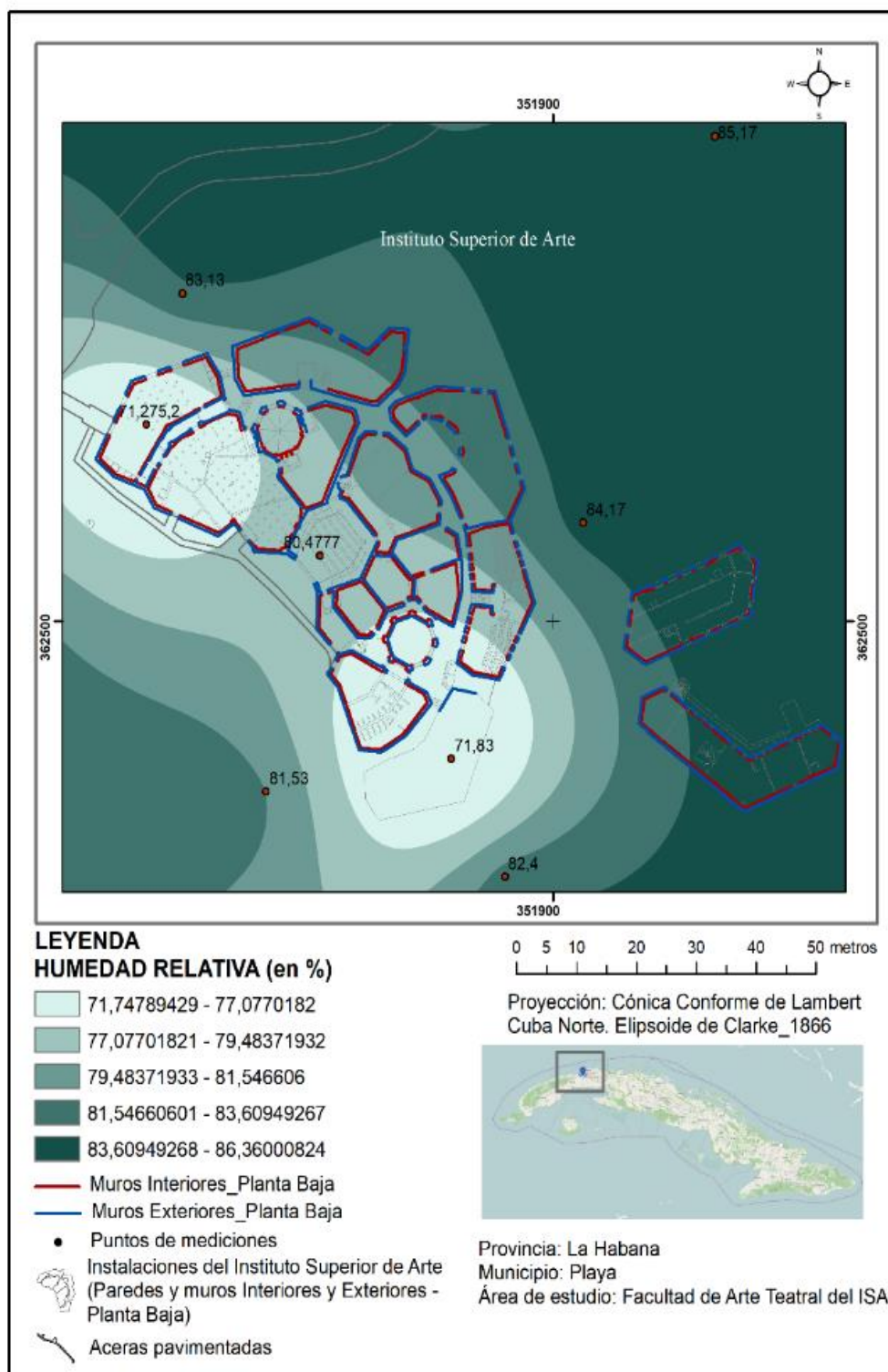
Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 7: Modelo digital de superficie.



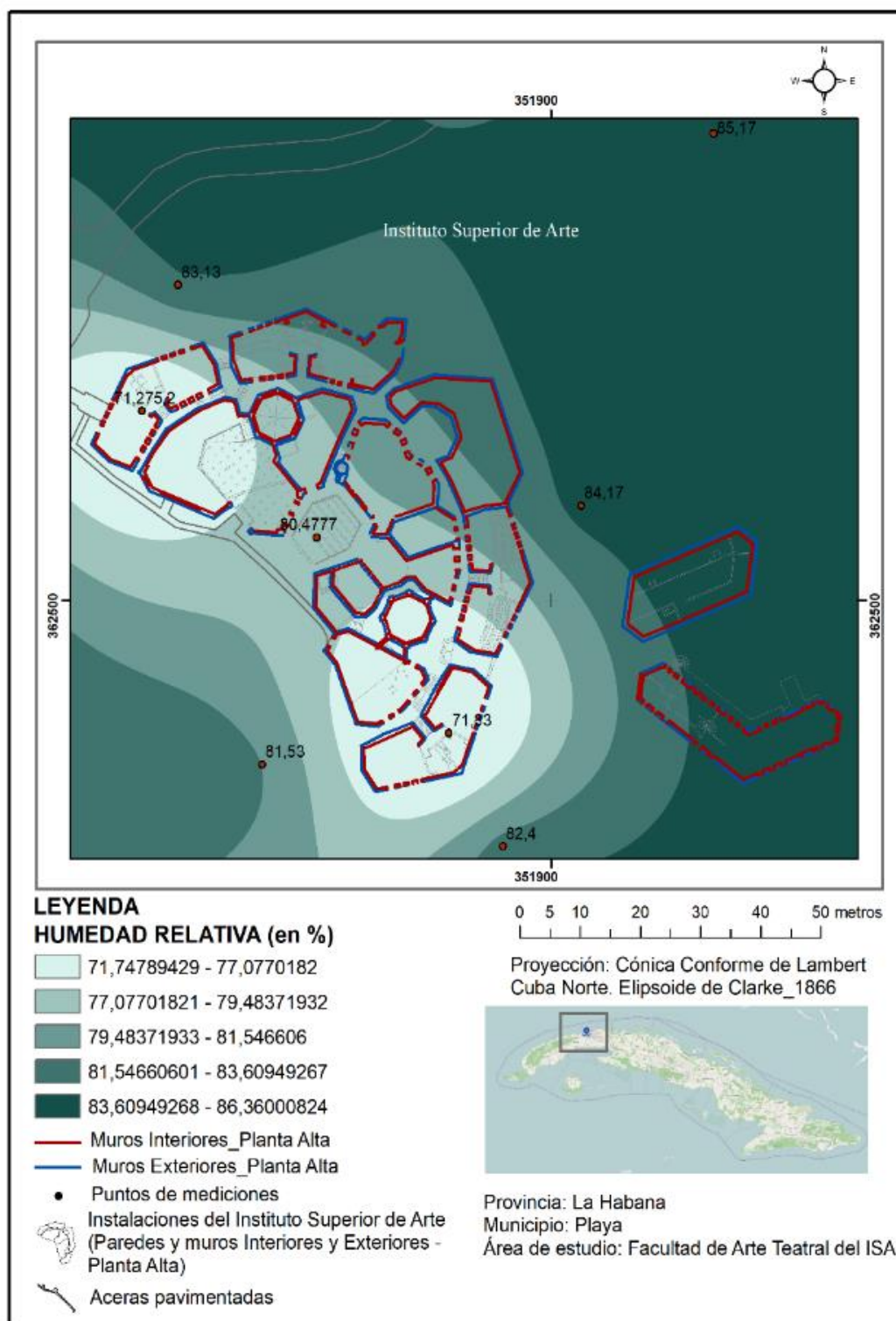
Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 8: Mapas de interpolación espacial de la humedad relativa y su relación con los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1.



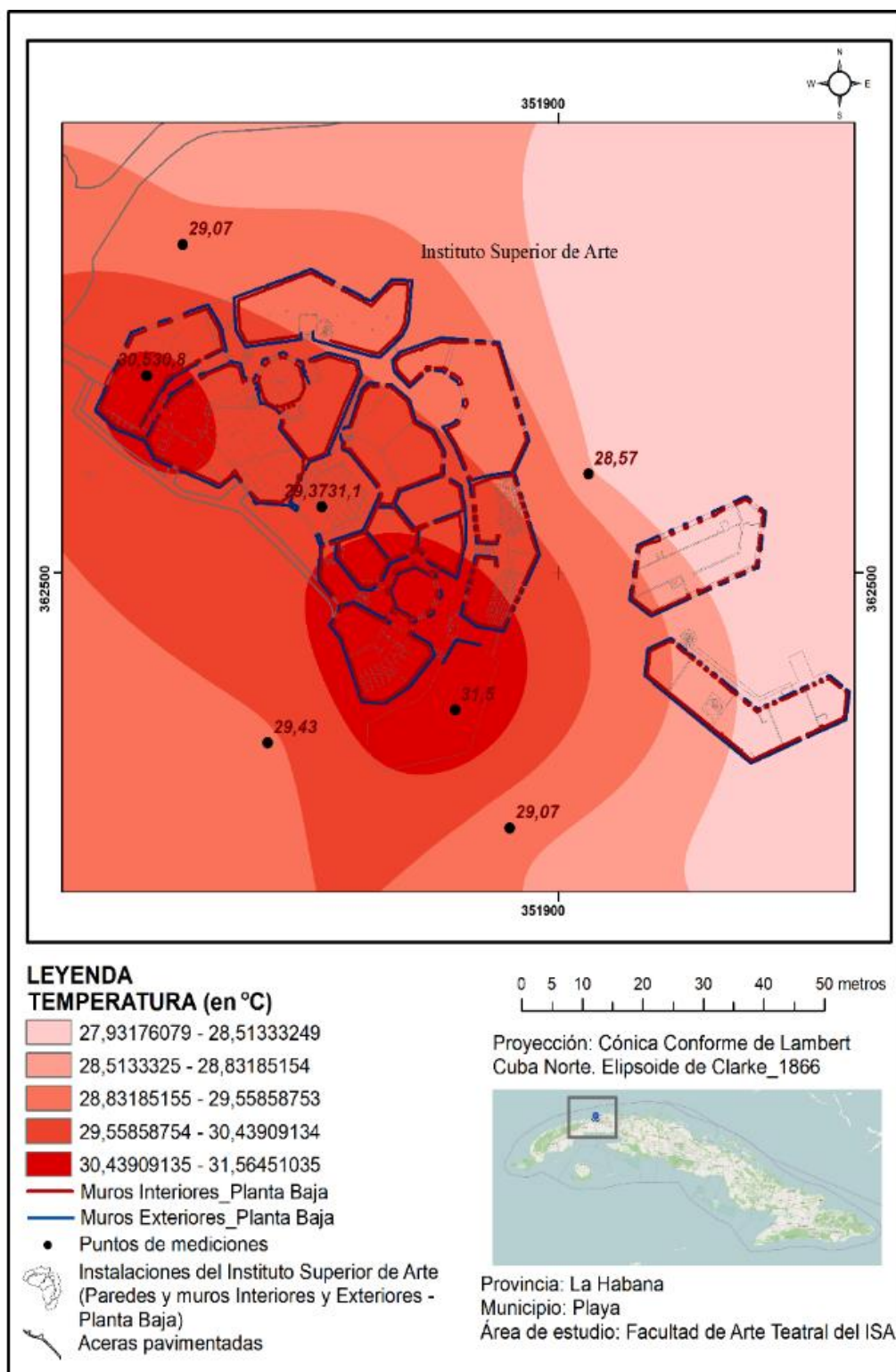
Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 9: Mapas de interpolación espacial de la humedad relativa y su relación con los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 2.



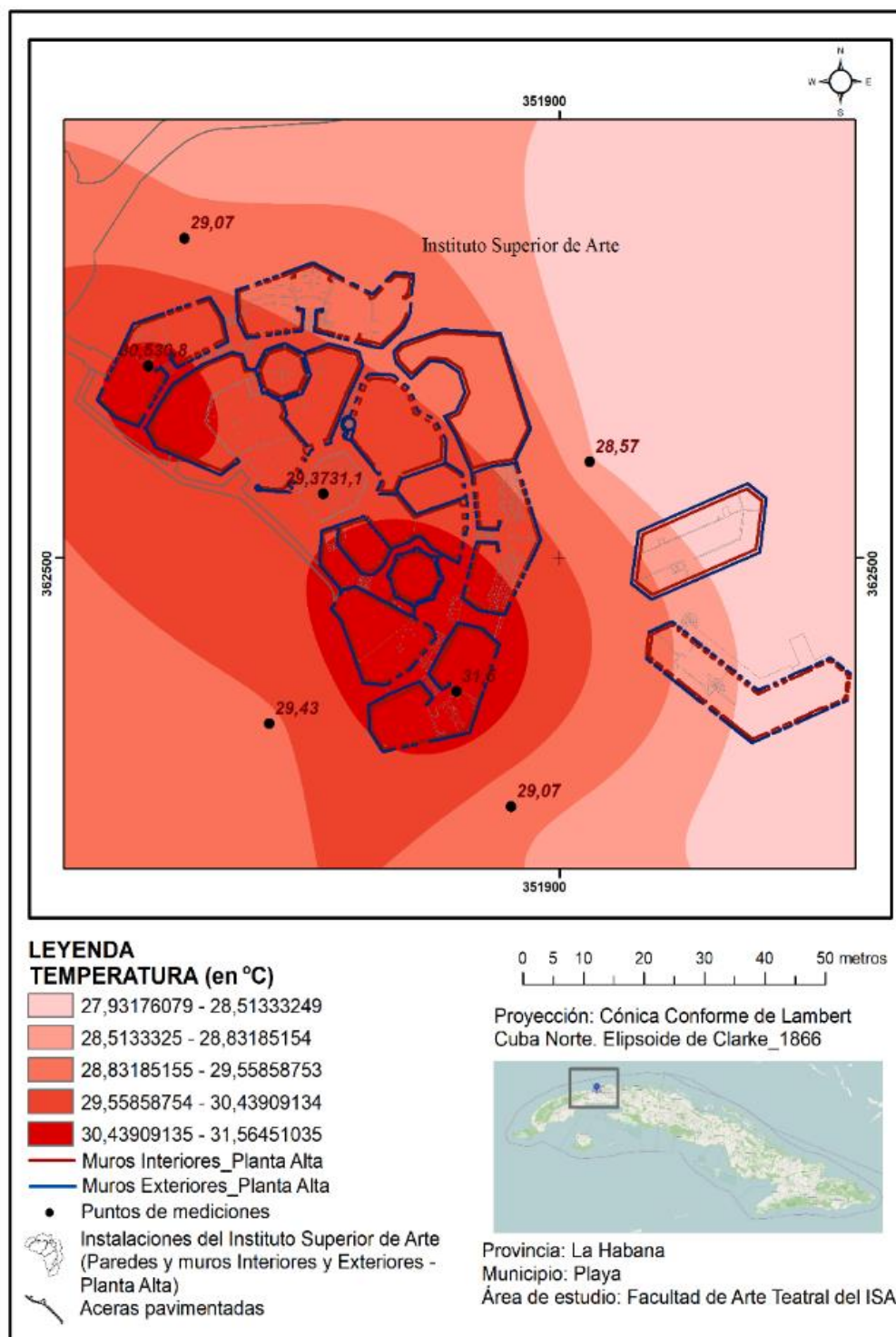
Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 10: Mapas de interpolación espacial de la temperatura atmosférica y su relación con los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 1.



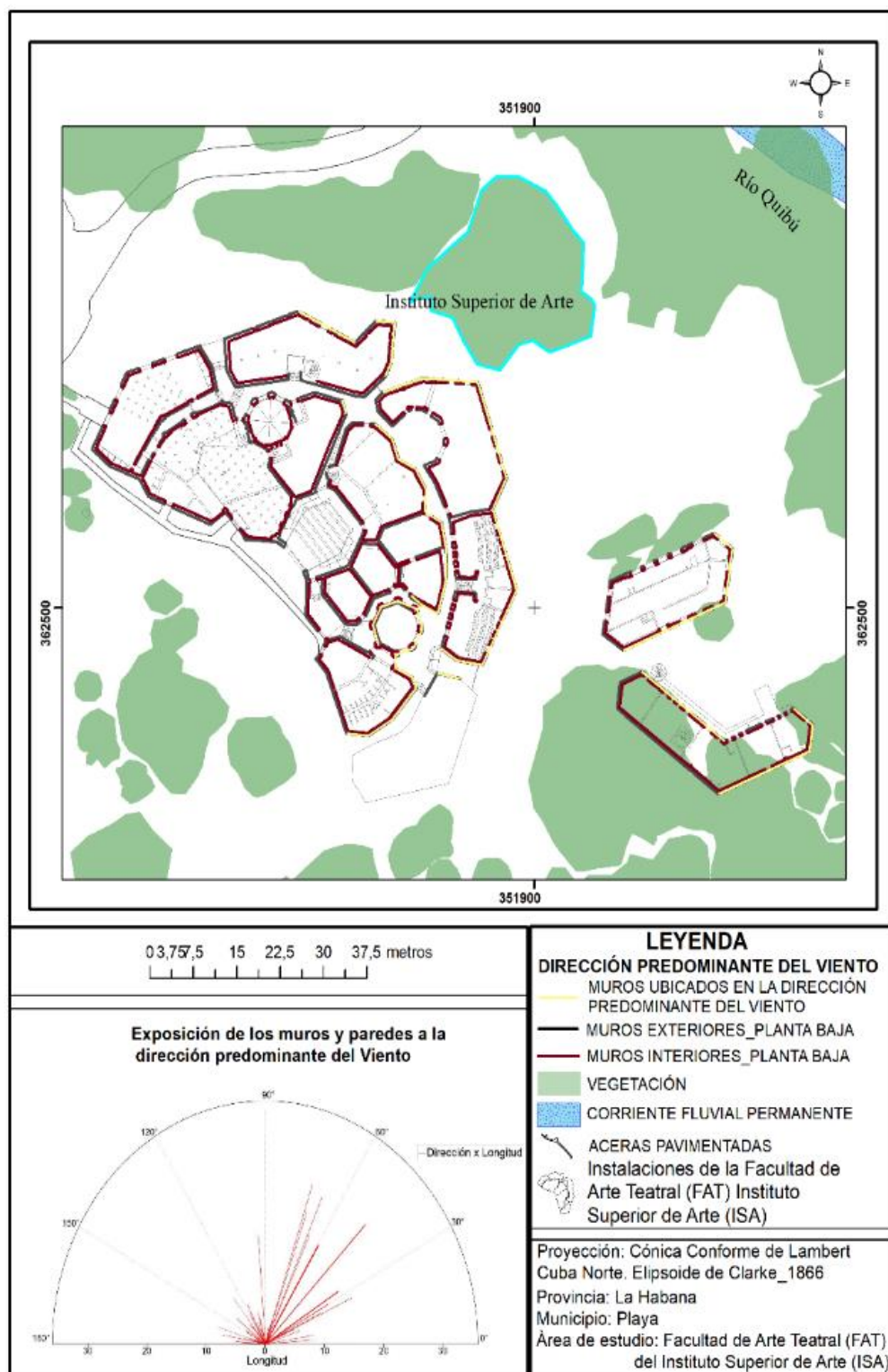
Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 11: Mapas de interpolación espacial de la temperatura atmosférica y su relación con los muros y paredes interiores y exteriores del nivel 2.



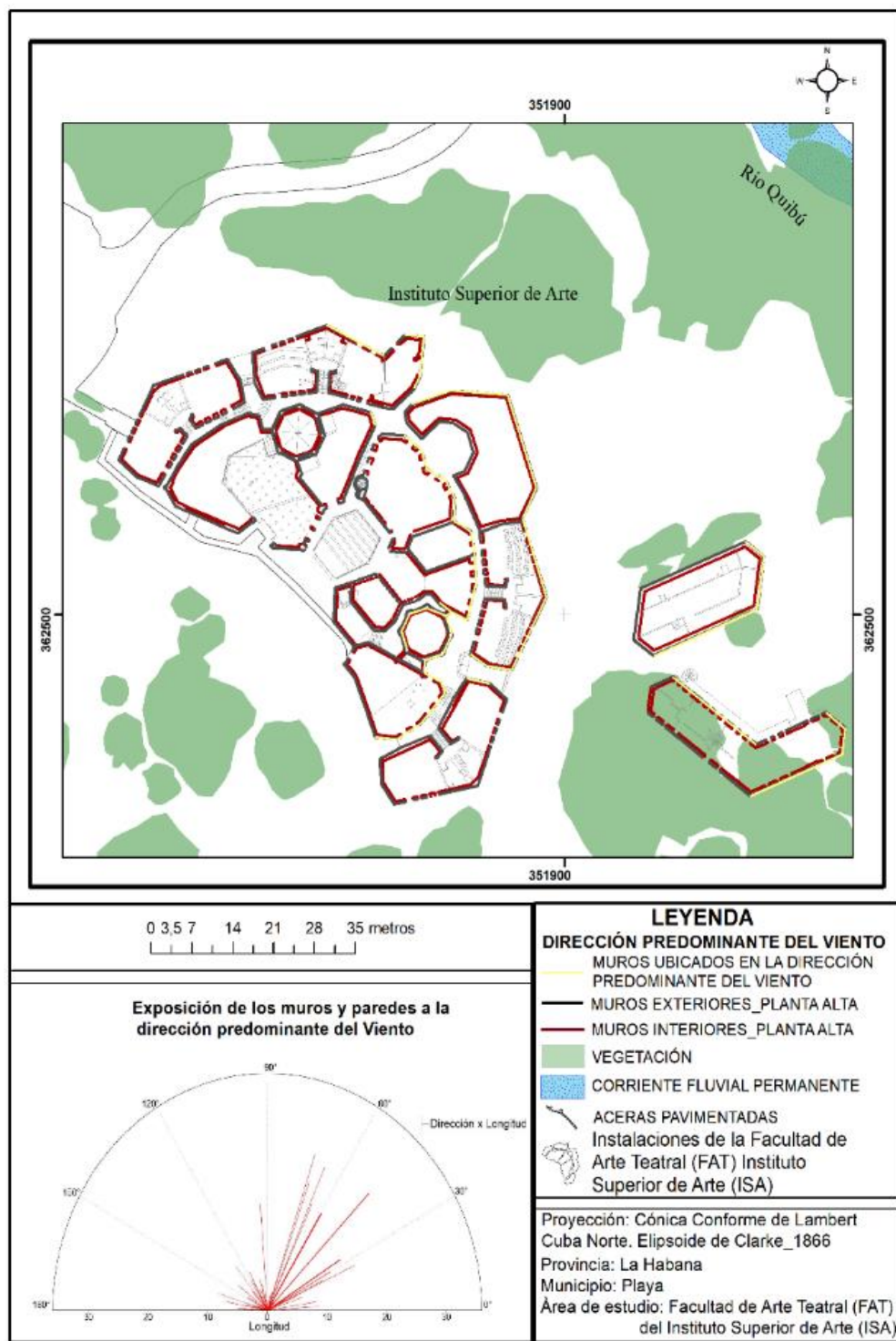
Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 12: Mapa de representación de la exposición de las paredes y muros interiores y exteriores a la dirección predominante del viento para el nivel 1.



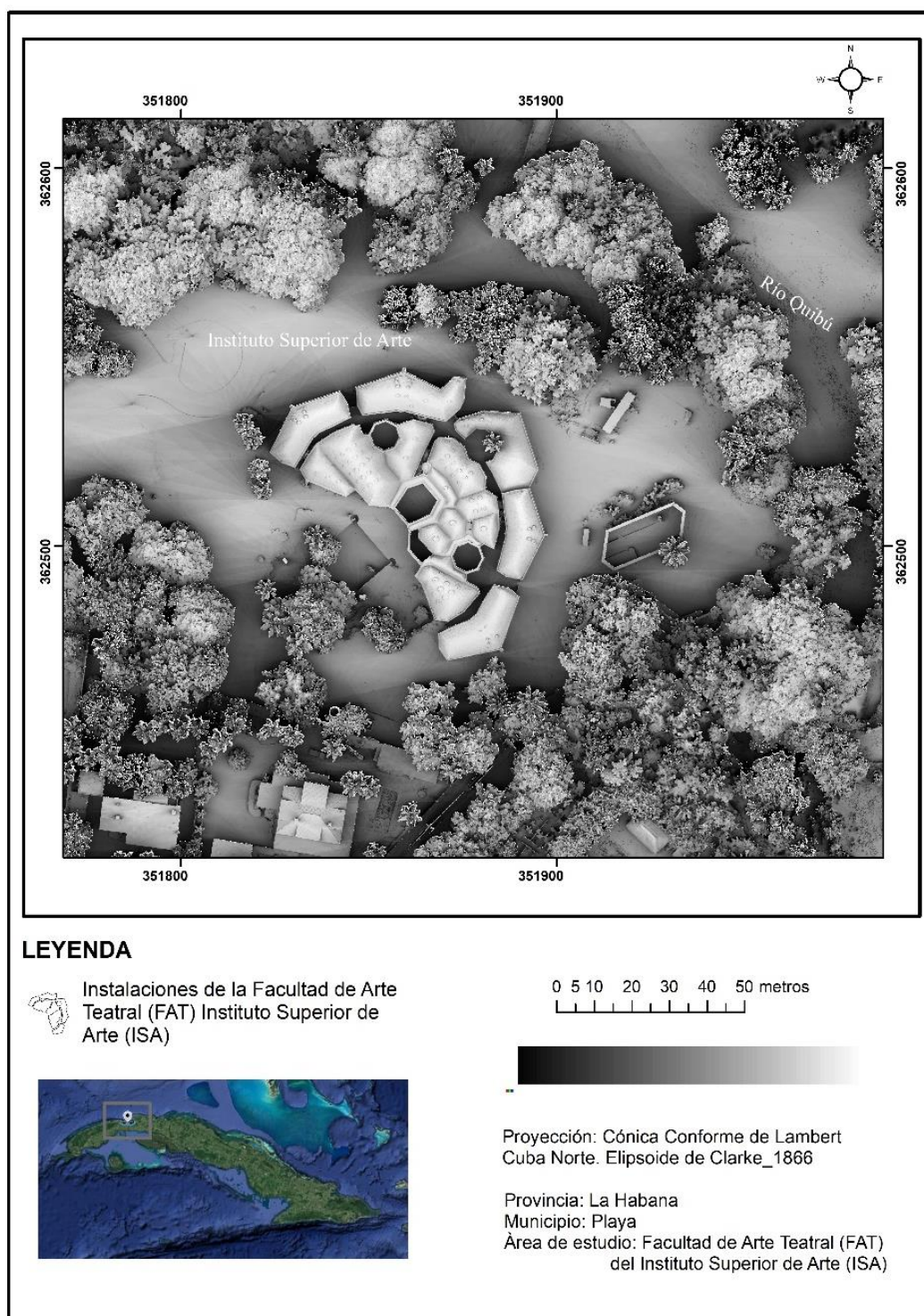
Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 13: Mapa de representación de la exposición de las paredes y muros interiores y exteriores a la dirección predominante del viento para el nivel 2.



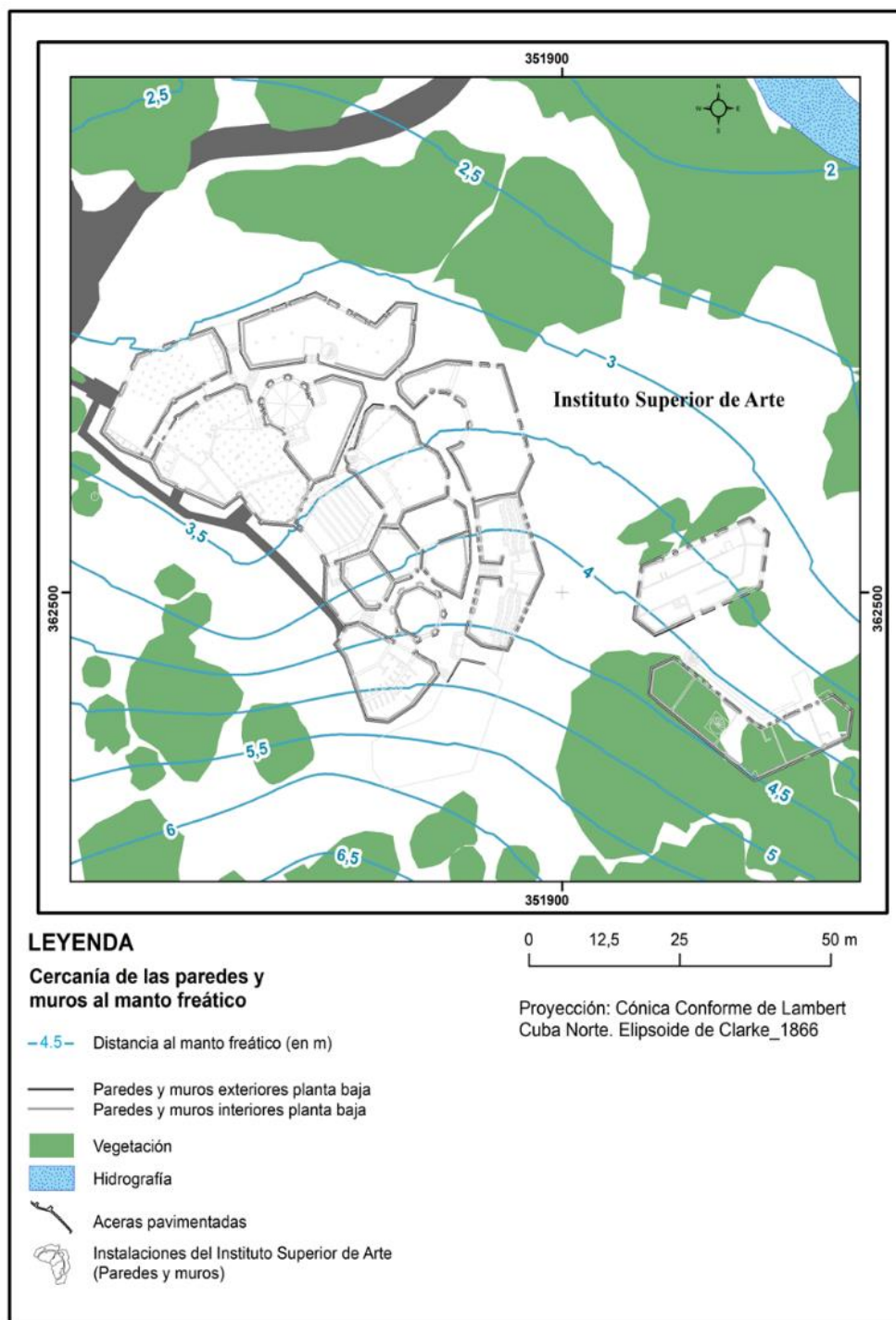
Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 14: Mapa de representación de la exposición de las paredes y muros interiores y exteriores a la radiación solar.



Fuente: Elaborada por la autora.

ANEXO 15: Mapa de representación de la cercanía de las paredes y muros interiores y exteriores al manto freático.



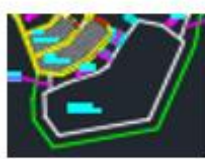
Fuente: elaborada por la autora a partir de datos propiciados por mediciones realizadas por la ENIA.

ANEXO 16: Informe patológico detallado

Informe Patológico				
Fecha de registro: 4 de noviembre de 2022 Nombre del inmueble: Facultad de Arte Teatral. Zona de trabajo: Instituto Superior de Arte (ISA) Localización: Bloque A				
Elemento Constructivo	Material	Ubicación		
Muro 5	Ladrillo	Vista Tridimensional 3D 	Vista Bidimensional 2D 	Planos 
Patología	Eflorescencia			
Descripción de la patología				
Se definen como la formación de depósitos de sales minerales solubles sobre la superficie de una pieza cerámica terminada, por exposición a los agentes atmosféricos. La causa real de la formación de estos depósitos es la migración de una solución salina a través de los poros inmediatos de la misma, al evaporarse el agua existente. Diferenciaremos entre eflorescencias como depósitos superficiales de las criptoflorescencias, que son depósitos interiores en los poros del material, son más peligrosas que las eflorescencias ya que en combinación con agua y hielo puede producir el deterioro del material. La mayoría se eliminan mediante lavado con agua o productos adecuados para su eliminación y cepillado.			Símbolo 	
			Imagen 	
Síntomas		Causas		
1- Manchas blancas 2- Manchas amarillas 3- Manchas marrones 4- Manchas rojizas 5- Manchas verdes 6- Decoloración		1- Está ubicada en lugar húmedo. 2- Posee Manchas hasta 1,2 m de altura. 3- Existen marcados cambios de temperaturas en el transcurso del día. 4- Exposición a la lluvia y al hielo. 5- Ubicación en dirección al sentido del viento.		
Soluciones		Análisis Patológico (%)		
Para eliminar la eflorescencia se debe aplicar agua a presión y con un cepillo actuar sobre la superficie, pero en ocasiones es necesario el uso de un limpiador específico para este tipo de patologías.		Afectación	Valores	
		Temperatura	24 °C	
		Presión	1011 hPa	
		Humedad	78 %	
		Hora de medición	10/11/2022, 10:00:00	
		Eflorescencia		
Otras Observaciones:	Tras la limpieza es importante dejar que se seque bien la superficie para evitar que aparezcan de nuevo las manchas o problemas de humedad.			
Entidad que solicita: Oficina del Historiador de la Habana.				

Fuente: elaborada por la autora.

ANEXO 17: Informe patológico general

Informe Patológico				
Fecha de registro: 2 de diciembre de 2022 Nombre del inmueble: Facultad de Arte Teatral. Zona de trabajo: Instituto Superior de Arte (ISA) Localización: Bloque A				
Elemento Constructivo	Material	Ubicación		
Bloque A	Ladrillo	Vista Tridimensional 3D	Vista Bidimensional 2D	Planos
				
Patología	Descripción de la patología	Ubicación	Imagen	Solución
Eflorescencia	Se definen como la formación de depósitos de sales minerales solubles sobre la superficie de una pieza cerámica terminada, por exposición a los agentes atmosféricos. La causa real de la formación de estos depósitos es la migración de una solución salina a través de los poros inmediatos de la misma, al evaporarse el agua existente. Diferenciaremos entre eflorescencias como depósitos superficiales de las criptoflorescencias, que son depósitos interiores en los poros del material, son más peligrosas que las eflorescencias ya que en combinación con agua y hielo puede producir el deterioro del material. La mayoría se eliminan mediante lavado con agua o productos adecuados para su eliminación y cepillado.	Muro 4		Para eliminar la eflorescencia se debe aplicar agua a presión y con un cepillo actuar sobre la superficie, pero en ocasiones es necesario el uso de un limpiador específico para este tipo de patologías.
		imagen 		
Erosión	Se define como la pérdida de material superficial, acabado exterior o elemento constructivo, resultado de la acción de agentes atmosféricos o de medio ambiente sobre una edificación. Generalmente la erosión en las obras de Ladrillo se debe a defectos en el mortero que liga unas piezas con otras, bien por mala dosificación del cemento o bien por compactación insuficiente en las juntas, o pueden darse ambas cosas a la vez. Se puede producir por rozamiento o por la acción del viento. Son especialmente vulnerables a esta acción las esquinas de las edificaciones.	Muro 2		-Deberán picarse las <u>juntas del mortero</u> en mal estado, alcanzando una profundidad mínima de 15 mm, hasta llegar al material sano. -Lavar con agua a presión o aire comprimido. -Rejuntar las piezas de ladrillo con un <u>mortero especial</u> prefabricado para este fin.
		imagen 		
Otras Observaciones:	Tras la limpieza es importante dejar que se seque bien la superficie para evitar que aparezcan de nuevo las manchas o problemas de humedad.			
Entidad que solicita: Oficina del Historiador de la Habana.				

Fuente: elaborada por la autora.

ANEXO 18: Análisis estadístico de gravedad del deterioro y prioridad en la intervención. Fuente: elaborada por la autora.

Nivel	Orientación de paredes y muros	Porcentajes por encima de la X +1 SD	Número de paredes y muros	Número de paredes y muros (en %)	Longitud de paredes u muros (en m)	Longitud de paredes u muros (en %)
Nivel 1	Exteriores	Prioridad por Gravedad del deterioro	17	10.96	118.14	14.76
		Prioridad por facilidad de intervención	16	10.52	116.08	14.51
Nivel 1	Interiores	Prioridad por Gravedad del deterioro	7	4.6	37,74	5.86
		Prioridad por facilidad de intervención	21	13.92	116,59	18.10
Nivel 2	Exteriores	Prioridad por Gravedad del deterioro	15	9.86	95,34	11.9
		Prioridad por facilidad de intervención	14	9.21	91,68	11.4
Nivel 2	Interiores	Prioridad por Gravedad del deterioro	24	14.37	99,52	11.48
		Prioridad por facilidad de intervención	22	13.25	95,44	11.01

Fuente: elaborada por la autora.

ANEXO 19: Resumen de los resultados del Índice de Kappa (paredes y muros exteriores)

			Ac real (Exterior Nivel 1)								Ac real (Exterior Nivel 2)				
			0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa				0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa
Ac Estimado (Exterior Nivel 1)	0	Recuento	40	12	52	152	0,561	0	Recuento	51	12	63	167	0,613	
		% del total	26,30%	7,90%	34,20%				% del total	30,50%	7,20%	37,70%			
	1	Recuento	19	81	100			1	Recuento	19	85	104			
		% del total	12,50%	53,30%	65,80%				% del total	11,40%	50,90%	62,30%			
	Total	Recuento	59	93	152			Total	Recuento	70	97	167			
% del total	38,80%	61,20%	100,00%	% del total	41,90%	58,10%	100,00%								
			Abreal (Exterior Nivel 1)								Abreal (Exterior Nivel 2)				
			0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa				0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa
Ab Estimado (Exterior Nivel 1)	0	Recuento	33	15	48	152	0,569	0	Recuento	42	20	62	167	0,602	
		% del total	21,70%	9,90%	31,60%				% del total	25,10%	12,00%	37,10%			
	1	Recuento	13	91	104			1	Recuento	10	95	105			
		% del total	8,60%	59,90%	68,40%				% del total	6,00%	56,90%	62,90%			
	Total	Recuento	46	106	152			Total	Recuento	52	115	167			
% del total	30,30%	69,70%	100,00%	% del total	31,10%	68,90%	100,00%								
			Dpreal (Exterior Nivel 1)								Dp real (Exterior Nivel 2)				
			0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa				0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa
Dp Estimado (Exterior Nivel 1)	0	Recuento	139	2	141	152	0,608	0	Recuento	151	0	151	167	0,584	
		% del total	91,40%	1,30%	92,80%				% del total	90,40%	0,00%	90,40%			
	1	Recuento	5	6	11			1	Recuento	9	7	16			
		% del total	3,30%	3,90%	7,20%				% del total	5,40%	4,20%	9,60%			
	Total	Recuento	144	8	152			Total	Recuento	160	7	167			
% del total	94,70%	5,30%	100,00%	% del total	95,80%	4,20%	100,00%								
			Ds real (Exterior Nivel 1)								Ds real (Exterior Nivel 2)				
			0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa				0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa
Ds Estimado (Exterior Nivel 1)	0	Recuento	37	15	52	152	0,512	0	Recuento	34	11	45	167	0,491	
		% del total	24,30%	9,90%	34,20%				% del total	20,40%	6,60%	26,90%			
	1	Recuento	19	81	100			1	Recuento	26	96	122			
		% del total	12,50%	53,30%	65,80%				% del total	15,60%	57,50%	73,10%			
	Total	Recuento	56	96	152			Total	Recuento	60	107	167			
% del total	36,80%	63,20%	100,00%	% del total	35,90%	64,10%	100,00%								
			Pm real (Exterior Nivel 1)								Pm real (Exterior Nivel 2)				
			0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa				0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa
Pm Estimado (Exterior Nivel 1)	0	Recuento	17	8	25	152	0,693	0	Recuento	15	11	26	167	0,616	
		% del total	11,20%	5,30%	16,40%				% del total	9,00%	6,60%	15,60%			
	1	Recuento	4	123	127			1	Recuento	4	137	141			
		% del total	2,60%	80,90%	83,60%				% del total	2,40%	82,00%	84,40%			
	Total	Recuento	21	131	152			Total	Recuento	19	148	167			
% del total	13,80%	86,20%	100,00%	% del total	11,40%	88,60%	100,00%								

Fuente: elaborada por la autora.

ANEXO 20: Resumen de los resultados del Índice de Kappa (paredes y muros interiores)

			Ac real (Interior Nivel 1)												
			0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa								
Ac Estimado (Interior Nivel 1)	0	Recuento	28	23	51	150	0,531	0	Recuento	41	36	77	168	0,446	
		% del total	18,70%	15,30%	34,00%				% del total	24,40%	21,40%	45,80%			
	1	Recuento	6	93	99			1	Recuento	9	82	91			
		% del total	4,00%	62,00%	66,00%				% del total	5,40%	48,80%	54,20%			
	Total	Recuento	34	116	150			Total	Recuento	50	118	168			
		% del total	22,70%	77,30%	100,00%			% del total	29,80%	70,20%	100,00%				
			Ab real (Interior Nivel 1)												
			0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa				0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa
Ab Estimado (Interior Nivel 1)	0	Recuento	119	0	119	150	0,501	0	Recuento	76	22	98	168	0,448	
		% del total	79,30%	0,00%	79,30%				% del total	45,20%	13,10%	58,30%			
	1	Recuento	19	12	31			1	Recuento	23	47	70			
		% del total	12,70%	8,00%	20,70%				% del total	13,70%	28,00%	41,70%			
	Total	Recuento	138	12	150			Total	Recuento	99	69	168			
		% del total	92,00%	8,00%	100,00%			% del total	58,90%	41,10%	100,00%				
			Dp real (Interior Nivel 1)												
			0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa				0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa
Dp Estimado (Interior Nivel 1)	0	Recuento	138	1	139	150	0,566	0	Recuento	149	2	151	168	0,56	
		% del total	92,00%	0,70%	92,70%				% del total	88,70%	1,20%	89,90%			
	1	Recuento	6	5	11			1	Recuento	9	8	17			
		% del total	4,00%	3,30%	7,30%				% del total	5,40%	4,80%	10,10%			
	Total	Recuento	144	6	150			Total	Recuento	158	10	168			
		% del total	96,00%	4,00%	100,00%			% del total	94,00%	6,00%	100,00%				
			Ds real (Interior Nivel 1)												
			0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa				0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa
Ds Estimado (Interior Nivel 1)	0	Recuento	28	26	54	150	0,469	0	Recuento	39	28	67	168	0,392	
		% del total	18,70%	17,30%	36,00%				% del total	23,20%	16,70%	39,90%			
	1	Recuento	8	88	96			1	Recuento	20	81	101			
		% del total	5,30%	58,70%	64,00%				% del total	11,90%	48,20%	60,10%			
	Total	Recuento	36	114	150			Total	Recuento	59	109	168			
		% del total	24,00%	76,00%	100,00%			% del total	35,10%	64,90%	100,00%				
			Pm real (Interior Nivel 1)												
			0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa				0	1	total	N de casos válidos	Cálculo Kappa
Pm Estimado (Interior Nivel 1)	0	Recuento	25	11	36	150	0,584	0	Recuento	40	22	62	168	0,504	
		% del total	16,70%	7,30%	24,00%				% del total	23,80%	13,10%	36,90%			
	1	Recuento	12	102	114			1	Recuento	16	90	106			
		% del total	8,00%	68,00%	76,00%				% del total	9,50%	53,60%	63,10%			
	Total	Recuento	37	113	150			Total	Recuento	56	112	168			
		% del total	24,70%	75,30%	100,00%			% del total	33,30%	66,70%	100,00%				

Fuente: elaborada por la autora.