

<https://doi.org/10.17163/abyaups.78.569>

Sistema de monitoreo de Bienes Patrimoniales IoT. Un caso piloto en el centro histórico de Cuenca, Ecuador

Juan-Carlos Cobos-Torres

Universidad Católica de Cuenca, Cuenca (Ecuador)

juan.cobos@ucacue.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-8153-8379>

María del Cisne Aguirre Ullauri

Universidad Católica de Cuenca, Cuenca (Ecuador)

maguirreu@ucacue.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-3179-7839>

Darío Humberto Cobos Torres

Universidad de las Américas, Quito (Ecuador)

dario.cobos@udla.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0002-9589-7633>

Introducción

La conservación de bienes culturales se ha centrado tradicionalmente en la protección y restauración de monumentos y edificios existentes, pero hoy el desafío de proyectar el uso y disfrute efectivo del patrimonio cultural se centra en la conservación impulsando estrategias de seguimiento y mantenimiento, la llamada conservación preventiva (Ortega-Ordaz y Ortega-Ordaz, 2020). Estos conceptos no son nuevos, desde la Carta de Atenas (ICOMOS, 2011) continuando con la Carta de Venecia (ICOMOS, 1965) o la Carta de Burra (Nallely y Nava, 1979), se pueden

recoger diferentes reflexiones y orientaciones en temas de mantenimiento y monitoreo. Esto ha llevado al Comité del Patrimonio Mundial a prestar especial atención a los procedimientos de gestión del patrimonio. Por lo tanto, se ha convertido en una prioridad para organizaciones como UNESCO, ICOMOS, ICCROM y varios estados a nivel mundial el tomar medidas para fortalecer el control, monitoreo de cambios físicos en el tiempo, así como desarrollar estrategias de conservación.

Estos esfuerzos se reflejan en el establecimiento de procesos de seguimiento periódico y receptivo. Sin embargo, con la inclusión de sitios naturales, culturales y mixtos en la Lista del Patrimonio Mundial (LPM), los problemas de gestión se han intensificado (Van Balen, 2009). Esta situación es aún más grave para diversos asentamientos a nivel mundial donde las condiciones territoriales son de alto riesgo geológico, por ejemplo, o en otros casos por la debilidad institucional, desarrollo tecnológico deficiente, presupuestos anuales limitados, así como decisiones complejas de gestión y gobernanza.

En 2003, ICOMOS desarrolló el documento denominado “Principios para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del patrimonio arquitectónico”, el cual se caracteriza por una conexión conceptual con los principios de la medicina preventiva definida por cuatro fases: 1) análisis, 2) diagnóstico, 3) tratamiento y, 4) control. Estas etapas del ciclo promueven la búsqueda de datos e información relevante, personalizar las causas de los daños y deterioro, seleccionar medidas correctivas y verificar la efectividad de las intervenciones (Van Balen, 2009). En este sentido, cada etapa requiere información integral sobre elementos del patrimonio cultural que puedan estudiarse a diferentes escalas.

A su vez, el desarrollo de iniciativas tecnológicas construidas desde la interdisciplinariedad brinda oportunidades para la gestión de bienes patrimoniales en ciudades de relevancia mundial como Cuenca o Quito, cuyo acervo edilicio es diverso y complejo. De hecho, la investigación y las aplicaciones tecnológicas en patrimonio cultural y arquitectura han avanzado mucho en las últimas décadas. Casos importantes en todo el

mundo han revelado los mismos problemas con la protección de activos, el acceso democrático, la difusión y la protección integral. Campiani *et al.* (2019) expone mediante un enfoque cuantitativo-cualitativo la factibilidad técnica de captar el deterioro de las características de los muros del complejo ubicado en Catalhöyük (Turquía) a lo largo del tiempo. Utilizan datos multitemporales de fuentes ambientales recopilados mediante el registrador TinyTag, se trata de una serie de registradores de datos que permiten controlar aspectos como la temperatura, el consumo de energía y los niveles de CO₂.

De igual manera, Campiani *et al.* (2019a) en otro estudio sobre evaluación cualitativa de la vulnerabilidad de muros de adobe y detección de cambios físicos en la superficie a través de la comparación de nubes de puntos obtenidas con escaneo láser, evidencia la construcción de mapas climáticos espacio-temporales de distribución de temperatura, humedad y vulnerabilidad utilizando el método de interpolación ponderada por distancia inversa (IDW). Tal como lo definen los autores, hay lugares donde se descubren vulnerabilidades en ciertos activos, así como los beneficios del uso de la tecnología para identificar tratamientos preventivos y correctivos, que a su vez están vinculados a programas de monitoreo para una mayor eficiencia. Otra variable que se suma al panorama anterior es la evaluación de riesgo y vulnerabilidad del patrimonio cultural. Este describe principalmente la incidencia ambiental sobre objetos particulares (Vidal *et al.*, 2019; Rovella *et al.*, 2021). En las investigaciones de Campiani *et al.* (2019b), Galán Huertos y Bernabé González (2006), Ortiz *et al.* (2014) y Ortiz y Ortiz (2016) se confirma la incidencia directa de las variables ambientales sobre la conservación a escala individual y territorial.

Adicionalmente, es interesante observar tanto el entorno exterior como el interior. Žarnić *et al.* (2015) dentro del proyecto europeo Cultural Heritage Identity Card exponen que, los factores ambientales a largo plazo generan un gran impacto en el patrimonio cultural, pero que, a su vez, está dado por su interacción y acción conjunta, más que por factores puntuales y acciones aisladas. En el caso particular de edificios religiosos,

Maksimović y Cosović (2019) afirmaron que estos edificios deben conservarse el mayor tiempo posible, porque en sí y las ricas colecciones que contienen representan una riqueza irremplazable, apoyan la preservación de las costumbres y pueden estimular el crecimiento económico. Por lo cual recomiendan la utilización e implementación de tecnologías, servicios de información y comunicación con una estructura unificada y principios de diseño tipo IoT (Internet de las Cosas) a fin de monitorear su estado. Propuesta similar ha sido planteada por Mesas-Carrascosa *et al.* (2016a) quienes mediante 15 estaciones de microclima dentro y fuera del edificio lo monitorean. En ambos casos, y en el del complejo de Catalhöyük (Turquía), los intereses de seguimiento se centran en campos estructurales, deterioro superficial y parámetros de temperatura y humedad, reflejando estudios sobre la presencia de CO₂ en el medio ambiente como factores determinantes del uso y disfrute del espacio.

Finalmente, en el caso del Ecuador, destacan múltiples esfuerzos INPC (2013); Arizaga (1999); Valeria *et al.* (2015); Rueda (2014); Heras *et al.* (2018); Carvajal y Heras (2020), quienes desde referentes niveles profesionales y de competencias legal, posicionan la necesidad de la identificación de lesiones, valoración del riesgo y vulnerabilidad como componentes de conservación patrimonial, pese a ello, el máximo aporte ha sido la colocación de seguridad electrónica como cámaras, sensores y sistemas de alarma de intrusión (Cortés Aguirre *et al.*, 2019).

Pese a lo previo, el interés de la conservación de bienes patrimoniales, no se enmarca en actuar solo cuando este presenta deterioros que deben ser reparados, a consecuencia de eventos naturales, condiciones medio ambientales o por el uso cotidiano del mismo. En este caso, la medición científica de un grupo significativo de variables permitirá entender el comportamiento de sus elementos constructivos y estructurales; y así definir, antes de que sea evidente el daño, las estrategias y acciones a implementar para garantizar su conservación. Por lo cual en esta investigación se buscó desarrollar e implementar tecnología de monitoreo no invasiva para un bien patrimonial de Cuenca-Ecuador. Estos sistemas de

monitoreo permitirán la generación de estudios de intervención y conservación preventiva arquitectónica, así como de ingeniería estructural de la edificación patrimonial llamada iglesia de El Sagrario o Catedral Vieja.

Estado del arte

Al igual que la arquitectura, la ingeniería civil puede enfocarse en el monitoreo de la salud estructural de templos y estructuras patrimoniales en general. Esta actividad puede realizarse mediante la utilización de sensores interconectados a través de IoT con lo cual, se puede llegar a proyectar el comportamiento estructural ante diferentes niveles de amenaza. La instrumentación sísmica de edificios ha llegado a establecerse en las últimas décadas como una de las formas más efectivas para validar los procedimientos de diseño y evaluar la seguridad sísmica de construcciones con características peculiares, tales como las iglesias. Estos, al ser monumentos históricos que representan la riqueza cultural del país, procedimientos de mantenimiento y conservación, actividades que en su mayor parte se han centrado en la detección de daños apreciables a simple vista y su reparación, ya sea estética o en algunos casos incluso estructural.

Según Aguilar Carboney *et al.* (2020), en las iglesias antiguas que analizó, los elementos más vulnerables y que presentaron los mayores daños, fueron los campanarios, bóvedas y cúpulas. También mencionan que en casos particulares el colapso se debió a una mala calidad de la mampostería o al deterioro de la misma, pero otros problemas tuvieron que ver con intervenciones anteriores, principalmente con elementos de hormigón.

Por su parte, Uva *et al.* (2019) propusieron un estudio sobre macroelementos y el proceso de jerarquía analítica para las antiguas iglesias de mampostería, ya que estas estructuras representan una tipología arquitectónica particularmente vulnerable. La experiencia adquirida progresivamente durante las observaciones posteriores al terremoto ha señalado patrones de daños recurrentes, y los principales mecanismos de falla se pueden identificar al observar por separado los diferentes macroelementos

arquitectónicos. Para ello, propusieron un sistema de información compuesto por una plataforma informática y un dispositivo móvil dedicado a la adquisición de datos, soportado por la tecnología IoT.

De igual manera, Fosca *et al.* (2019) presentan un estudio realizado en Perú, mediante el cual proponen una herramienta de visualización de monitoreo remoto utilizando aplicaciones simples y confiables disponibles en el mercado, y permitir el acceso a estos datos desde cualquier dispositivo electrónico con conexión a internet a través de la plataforma web. La herramienta desarrollada se utiliza para monitorear la iglesia de San Juan Bautista de Huaro, logrando recolectar información en tiempo real sobre frecuencias modales, amortiguamiento, aceleraciones máximas y media cuadrática RMS (*Root Mean Square*) máximo, que son relevantes para comprender la “salud” de la estructura.

Uno de los estudios más importantes realizados dentro del programa de rehabilitación de la Catedral de Ciudad de México fue el monitoreo del movimiento del terreno y la correspondiente respuesta estructural ante la ocurrencia de un evento sísmico a través de una red de acelerómetros instalados en el año 2000. El arreglo inicial incluía nueve instrumentos instalados en el techo, la base y una de las torres, además, otro acelerómetro fue instalado en campo libre, a 20 m de distancia del templo. Aunque el número y la posición de los sensores han sido modificados con el paso de los años, la red de instrumentación sísmica no ha dejado de registrar eventos desde su instalación. Durante este periodo, docenas de eventos sísmicos de intensidad variable —de baja a moderada— han sido registrados. El propósito de la red sísmica es detectar cambios en las propiedades dinámicas de la estructura, los cuáles se podrían atribuir a un posible daño estructural que afecte la seguridad del edificio (Meli Piralla y Sánchez, 2001).

Según Pérez Cotrina (2017), los estudios realizados por la Red Sísmica del Austro, demuestran que el grado de daño estructural está vinculado a una aceleración pico del terreno (*peak ground acceleration*) PGA de 0.25g. Este daño está presente en estructuras de mampostería

no reforzada-hormigón armado, hasta el colapso, es decir, la falla total de la edificación. A partir de esto, toda rehabilitación arquitectónica de una edificación patrimonial gana importancia, pues no se trata de devolver o mantener el estado de la edificación, menos, el insertar elementos estructurales que alteren su valor intrínseco, sino por el contrario, se trata de ejecutar intervenciones que garanticen la integridad de la vida y permitan disminuir impactos en los bienes patrimoniales, ante la presencia de un movimiento sísmico.

La respuesta sísmica de los monumentos históricos presenta diferencias sustanciales respecto a la respuesta de los edificios modernos comunes. Estas diferencias se derivan de las distintas formas arquitectónicas y configuraciones estructurales de los edificios, y también del hecho que los materiales de los elementos estructurales de los edificios antiguos no tienen la suficiente capacidad para resistir los esfuerzos significativos producidos, lo que conduce a que no se pueda lograr continuidad adecuada entre los elementos, y da lugar a que se tengan mecanismos muy peculiares para absorber los efectos sísmicos (Alcántara, 2018). La interacción de estructuras extraordinariamente rígidas y masivas, como las de los edificios históricos, con suelos blandos y deformables como la arcilla, modifica sustancialmente las vibraciones inducidas por un sismo, mientras que para la mayor parte de los edificios modernos este efecto es de importancia mucho menor. Lo anterior hace que estos estudios y mediciones acerca del comportamiento sísmico sean de vital importancia en edificios patrimoniales como en el caso de la iglesia de El Sagrario o Catedral Vieja de Cuenca.

Desarrollo

Metodología

La problemática central que motivó a esta investigación fue el costo elevado de equipos de monitoreo licenciados, por lo mismo dentro del nivel investigativo aplicativo se diseñó y construyó estaciones de mo-

nitoreo ambiental y de vibraciones. Adicionalmente, enmarcándose en una investigación de tipo cuantitativo-longitudinal, se está cuantificando distintas variables de calidad de aire y vibraciones durante un periodo de tiempo de siete días.

En primer lugar, se realizó la revisión bibliográfica en bases de datos científicas, de calidad y confiables, como Scopus, Scielo y Web of Science, de diferentes tipos de artículos que contengan información sobre sistemas de monitoreo ambiental y vibracional existentes en la actualidad (artículos de los últimos cinco años), así como los diferentes tipos de agentes contaminantes que pueden afectar los bienes patrimoniales, todo esto con el objetivo de comprender y determinar el alcance de este proyecto de investigación.

Una vez determinada la lista de variables a ser monitorizadas, se seleccionó y adquirió los sensores electrónicos y electroquímicos necesarios para la construcción de las estaciones de monitoreo. Las variables que son monitorizadas, se pueden observar en la tabla 1. De igual manera, se realizó una primera determinación de los puntos a ser monitorizados en el bien patrimonial la iglesia El Sagrario.

Tabla 1

Lista de sensores seleccionados para cada variable a ser medida

Sensor	Variable	
MG-811	Dióxido de carbono	Ambiental Interior
DHT-22	Temperatura y humedad relativa	
KY-037	Sonido	
GP2Y1010AU0F	Material particulado	
VEML6070	Luz ultravioleta	
MG-811	Dióxido de carbono	Ambiente Exterior
MiCS-4514	Monóxido de carbono	
	Dióxido de Nitrógeno	

Sensor	Variable	
SEN0470	Dióxido de Azufre	
SEN0467	Sulfuro de Hidrógeno	
MQ131	Ozono	
DHT-22	Temperatura y humedad relativa	
KY-037	Sonido	
GP2Y1010AU0F	Material particulado	
VEML6070	Luz ultravioleta	
Pluviómetro	Precipitación	
Veleta	Dirección del viento	
Anemómetro	Velocidad del viento	
MPU9250	Aceleraciones	Vibracional

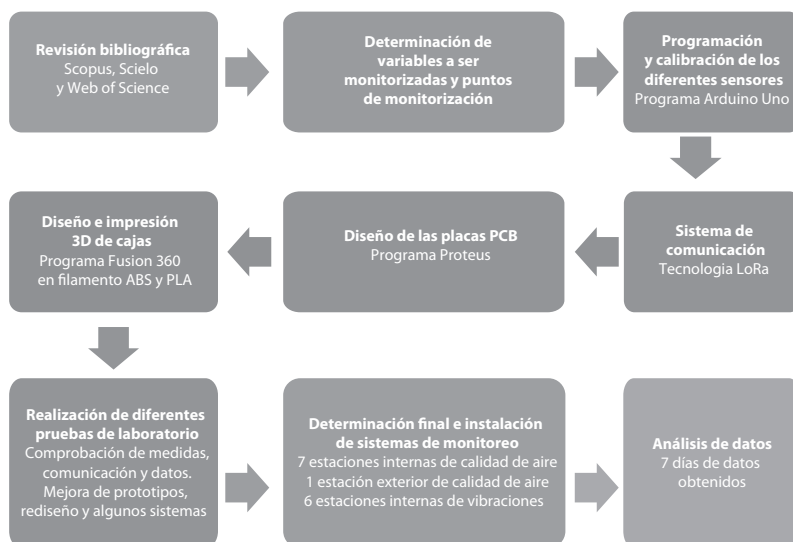
A continuación, por medio del software de programación para microcontroladores *Arduino Mega*, se procedió con la programación para el funcionamiento y calibración de los diferentes sensores para la respectiva medición de calidad de aire y vibración. Adicionalmente, se define el estándar para comunicación de los sistemas de monitoreo, hay que considerar que la iglesia El Sagrario es un bien patrimonial cuya nave central mide 40 x 15 metros y cuenta con capillas laterales. Adicionalmente, sus muros son de 60 cm o más al ser una construcción realizada en adobe en las paredes, ladrillo en la torre y piedras incásicas en el resto de su construcción, además cuenta con una cripta; por lo cual, se seleccionó el sistema de comunicación *LoRa* que es una tecnología ideal para conexiones a grandes distancias y para redes de IoT. Posteriormente, mediante el programa *Proteus* se realizó el diseño de las placas PCB y diseño del ruteado de pistas. También, se realizó el diseño 3D en el programa *Fusion 360* en filamento ABS y PLA de las diferentes cajas para los sistemas de monitoreo comprobando que cada una de las medidas sean exactas para su implementación.

Luego de haber desarrollado la programación de los sensores y diseño de los sistemas de monitoreo, se procedió físicamente con la impresión, ruteado de pistas, perforaciones de la placa PCB, soldadura de componentes electrónicos y la impresión 3D en ABS y PLA de las cajas de los sistemas de monitoreo de calidad de aire y vibración, respectivamente. Además, se realizaron pruebas de laboratorio para comprobar el funcionamiento.

Para la implementación de las cajas de los diferentes sistemas, se necesitó comprobar e identificar los diferentes puntos estratégicos del bien patrimonial, siendo definidas siete estaciones de monitoreo de calidad aire, seis estaciones de monitoreo de vibraciones y una estación de monitoreo exterior de calidad de aire. Asimismo, la respectiva instalación en los puntos donde son instalados los sistemas para un correcto funcionamiento y recopilación de información. Finalmente, una vez instalados los diferentes sistemas monitoreo, se pasó al respectivo análisis de datos preliminares que se recopilaban a lo largo del tiempo de una semana aproximadamente a través de la plataforma IoT *ThingSpeak*. A futuro y continuando con la investigación, se espera realizar un análisis exhaustivo y completo que permita tomar medidas de mantenimiento y conservación del bien patrimonial. El proceso realizado, se esquematiza en la figura 2.

Resultados iniciales

Los resultados obtenidos se detallan según los pasos seguidos para la implantación del sistema de monitoreo de la iglesia de El Sagrario. Así, luego de la revisión bibliográfica y determinación de variables a ser monitorizadas se procedió a la adquisición de los sensores, lo cual fue un reto. Ecuador es un país no privilegiado y la tecnología es difícil de obtener en las tiendas locales. Algunos sensores tuvieron que ser adquiridos en el extranjero. Por otro lado, en una visita *in situ* se determinó la ubicación y el número preliminar de puntos de monitorización (tabla 2).

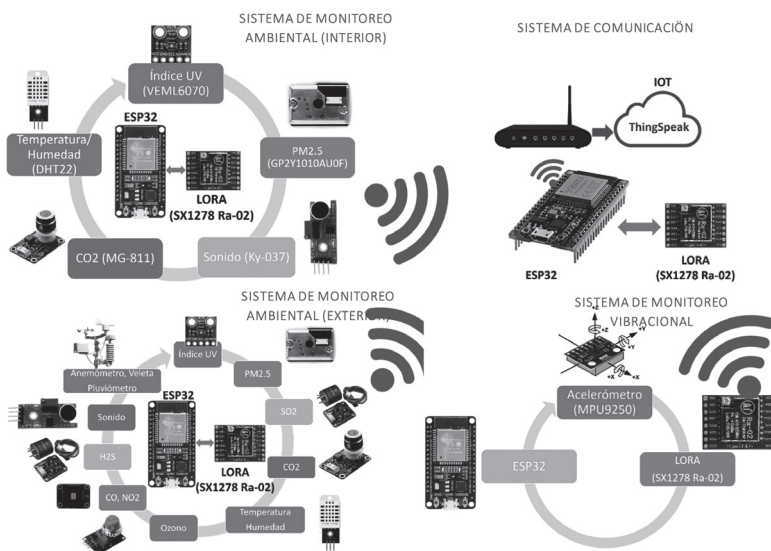
Figura 2*Detalle de los pasos seguidos para el monitoreo de la iglesia El Sagrario***Tabla 2***Detalle de ubicación de sistemas de monitoreo instalados*

Tipo de Estación	Ubicación	Cantidad
Ambiental Interior	Altar	1
	Nave central	2
	Capillas	4 (1 por capilla)
Ambiental Exterior	Campanario	1
Vibracionales	Arco Altar	1
	Arco Presbiterio	1
	Columna Nave central	1
	Acceso principal	1
	Cripta	1
	Campanario	1

Continuando con el diseño, se bosquejó cada sistema de monitoreo con su respectivo sistema de comunicación (figura 3). El primer sistema de monitoreo ambiental fue diseñado para el interior de la iglesia, compuesto por un microcontrolador, al cual se conecta los sensores de radiación UV, material particulado, sonido, dióxido de carbono, temperatura y humedad; adicionalmente, se conecta a un módulo *LoRa* para la comunicación. El segundo sistema de monitoreo ambiental fue diseñado para el exterior de la iglesia, con los mismos componentes que la estación interior más sensores de dióxido de azufre, ozono, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, sulfuro de hidrogeno, anemómetro, veleta y pluviómetro. El tercer sistema de monitoreo vibracional fue diseñado con un microcontrolador, un acelerómetro de tri-axial y un módulo *LoRa*. Finalmente, el cuarto sistema de comunicación fue diseñado con un microcontrolador, un módulo *LoRa* y un *router*. Este sistema recibe la información de todos los otros sistemas y los envía a la nube, a la plataforma IoT *ThingSpeak*.

Figura 3

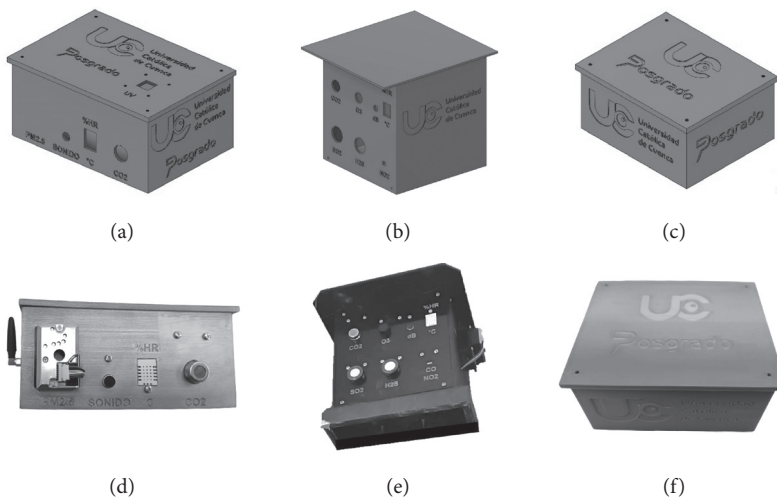
Esquematación de los sistemas de monitoreo diseñados



De manera paralela, se diseñó e imprimió lo circuitos impresos PCBs y las cajas que contienen los sensores. Para esto, se consideró los espacios disponibles y se trató de usar colores no invasivos con los ambientes del bien patrimonial (figura 5).

Figura 5

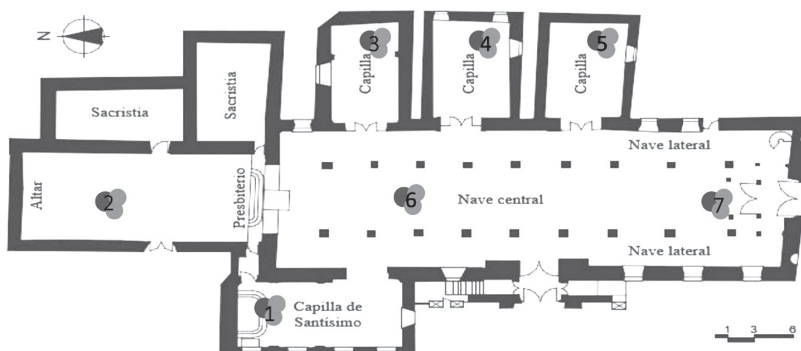
Diseños de cajas de monitoreo: a) ambiental interior, b) ambiental exterior, c) vibracional; impresiones: d) ambiental interior, e) ambiental exterior, f) vibracional



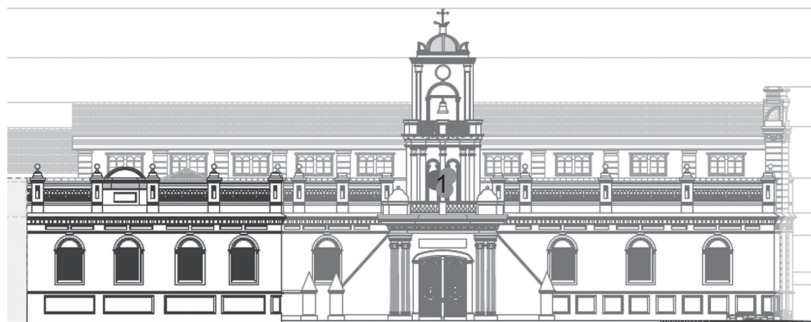
También se realizaron diferentes pruebas de laboratorio comprobando las mediciones y envío de datos a la nube. Con los equipos listos, se procedió a la determinación final e instalación de sistemas de monitoreo. Se estableció necesario colocar siete estaciones internas de calidad de aire, una estación exterior de calidad de aire y seis estaciones internas de vibraciones; su distribución se muestra en la figura 6, mientras que su implementación se evidencia en la figura 7.

Figura 6

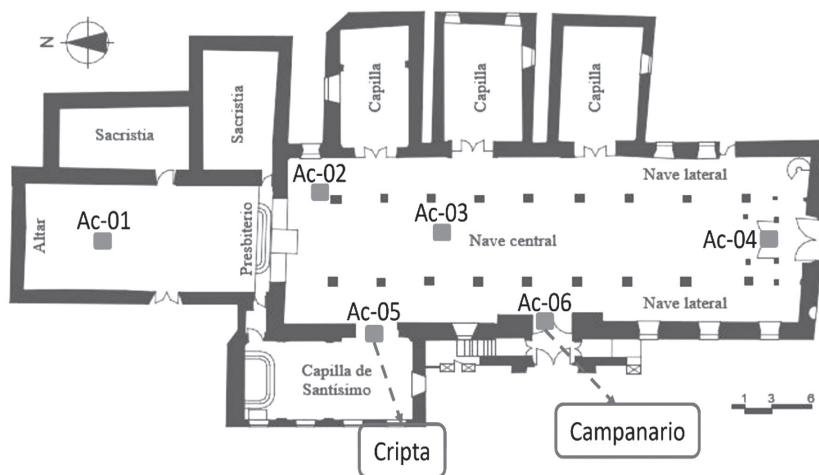
Ubicación de los puntos de monitoreo de la iglesia El Sagrario, detalle de sistemas ambientales: a) Planta baja, b) Fachada lateral; detalle de sistemas vibracionales: c) Planta baja, d) Fachada lateral



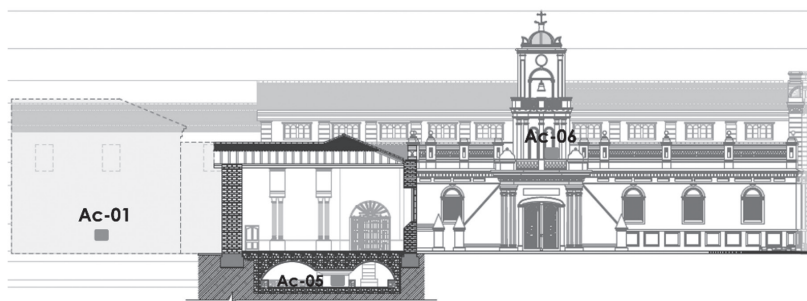
(a)



(b)



(c)



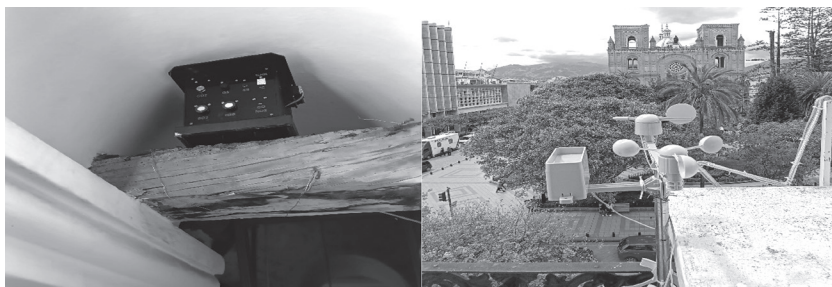
(d)

Figura 7

Estaciones de calidad de aire y vibración instaladas en: a) Estaciones de calidad aire instaladas en las capillas, b) Estación de calidad de aire instalada en el campanario, c) Estaciones de monitoreo de vibración instaladas en la cripta y en la columna de la nave central



(a)



(b)



(c)

Finalmente se detalla un análisis de algunos datos obtenidos durante una semana de monitoreo. Como se puede observar en la figura 8a, el Material Particulado medido por la Estación 2 y Estación 3 durante los siete días tiene un promedio de 9.021 y 7.568 ppm, respectivamente. De igual manera, en la figura 8b se puede observar que, la Estación 2 y Estación 4 tienen un promedio de 58.146 y 52.831 dB, respectivamente, en relación con la potencia acústica. Además, se observa en la Estación 1 una media de 40.170 pero con una desviación estándar de 4.014. En la figura 8c de temperatura se puede observar que la Estación 1, Estación 5 y Estación 6 tienen las medias más altas de temperatura ambiental con 17.127, 17.380 y 17.212 °C.

Por otro lado, la humedad registrada por las estaciones es similar; la Estación 2 captó la máxima media con 53.365 %, mientras que la Estación 6 la mínima media con 49.690 %, ver figura 8d. En cuanto, a las concentraciones de CO₂ captadas por las estaciones se puede observar que la Estación 4 y Estación 5 tienen la media más elevada de CO₂ con 519.520 y 466.616 ppm, ver figura 8e. Finalmente, la radiación UV siempre se encuentra en valores cercanos a cero entre la Estación 1 a la Estación 5, ver figura 8f. Más detalles estadísticos, se pueden analizar en la tabla 3.

Figura 8

Representación de múltiples variables agrupadas por estaciones con diagramas de caja y bigotes con muescas para mediciones diarias en el interior de la iglesia El Sagrario: a) Material Particulado 2.5, b) Potencia Acústica, c) Temperatura, d) Humedad Relativa, e) Concentración de CO₂ y f) Índice UV

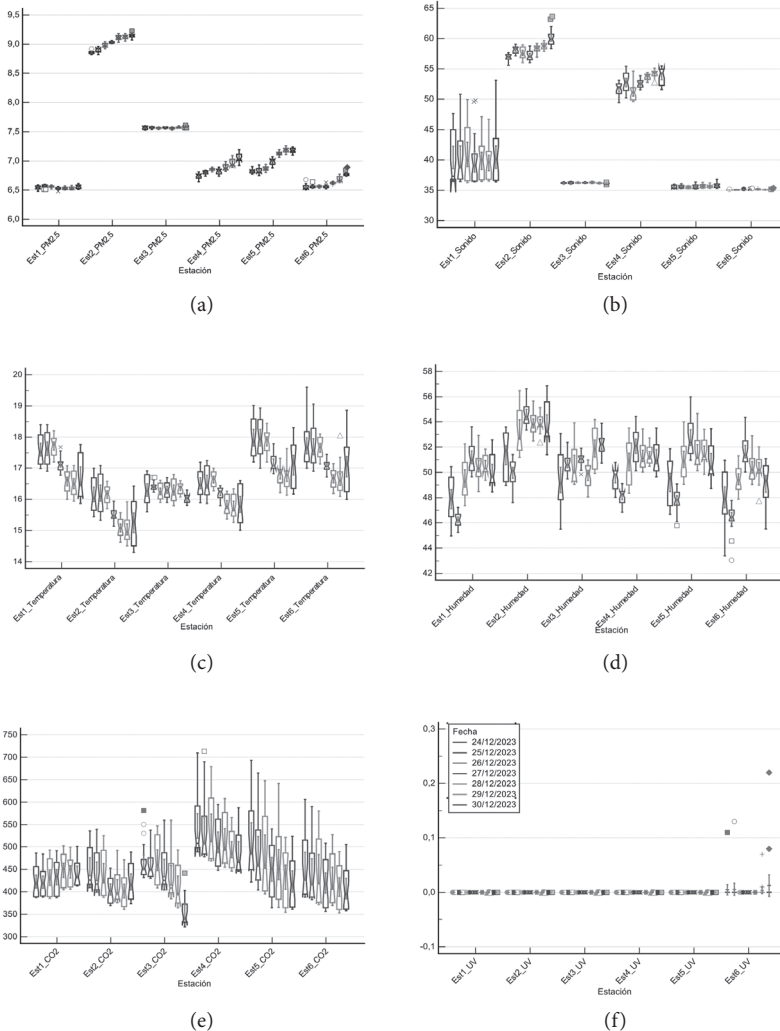


Tabla 3

Estadística resumen de estaciones interiores: mínimo, máximo, media, mediana, desviación estándar, percentiles

	Est1_PM	Est2_PM	Est3_PM	Est4_PM	Est5_PM	Est6_PM
N	168	168	159	168	168	168
Mínimo	6.480	8.820	7.530	6.640	6.750	6.500
Máximo	6.610	9.230	7.610	7.190	7.260	6.890
Media	6.544	9.021	7.568	6.876	6.999	6.615
Mediana	6.545	9.030	7.570	6.850	7.000	6.590
SD	0.03040	0.1088	0.01698	0.1103	0.1575	0.08504
25 - 75 P	6.520 a 6.570	8.930 a 9.120	7.560 a 7.580	6.800 a 6.930	6.845 a 7.150	6.550 a 6.650
	Est1_Son	Est2_Son	Est3_Son	Est4_Son	Est5_Son	Est6_Son
N	168	168	159	168	168	168
Mínimo	36.250	55.610	35.930	49.450	35.190	35.020
Máximo	53.120	63.610	36.460	55.500	36.810	35.380
Media	40.170	58.146	36.202	52.831	35.607	35.094
Mediana	39.895	58.150	36.200	52.975	35.605	35.080
SD	4.0143	1.2993	0.1088	1.5118	0.2914	0.05444
25 - 75 P	36.690 a 43.050	57.285 a 58.825	36.120 a 36.280	51.780 a 54.115	35.350 a 35.820	35.060 a 35.110

	Est1_Tem	Est2_Tem	Est3_Tem	Est4_Tem	Est5_Tem	Est6_Tem
N	168	168	159	168	168	168
Mínimo	15.870	14.300	15.600	15.010	16.140	16.000
Máximo	18.400	17.090	16.910	17.240	19.010	19.600
Media	17.127	15.629	16.297	16.199	17.380	17.212
Mediana	17.100	15.565	16.300	16.215	17.305	17.140
SD	0.6581	0.6843	0.3029	0.5257	0.7156	0.6616
25 - 75 P	16.690 a 17.620	15.145 a 16.100	16.070 a 16.510	15.880 a 16.550	16.870 a 17.875	16.820 a 17.665
	Est1_Hum	Est2_Hum	Est3_Hum	Est4_Hum	Est5_Hum	Est6_Hum
N	168	168	159	168	168	168
Mínimo	44.970	47.610	45.490	46.840	45.790	43.030
Máximo	53.620	56.870	54.180	54.430	55.990	54.360
Media	49.438	53.004	50.730	50.633	50.713	49.347
Mediana	49.805	53.365	50.700	50.645	50.990	49.690
SD	2.0439	2.0358	1.6512	1.6825	2.0542	2.0440
25 - 75 P	48.110 a 50.875	51.710 a 54.435	49.872 a 51.633	49.505 a 51.920	49.285 a 52.050	47.820 a 50.760

	Est1_CO ₂	Est2_CO ₂	Est3_CO ₂	Est4_CO ₂	Est5_CO ₂	Est6_CO ₂
N	168	168	159	168	168	168
Mínimo	385.540	360.940	322.380	446.030	354.660	353.170
Máximo	502.790	539.350	580.850	713.260	693.150	606.420
Media	435.177	426.465	441.599	519.520	466.616	431.784
Mediana	433.060	415.980	437.290	499.995	455.075	412.610
SD	36.2259	45.9270	55.2525	62.2859	79.3615	63.6208
25 - 75 P	405.015 a 466.025	389.580 a 458.445	405.122 a 474.440	469.435 a 565.645	399.650 a 516.675	377.400 a 478.970
	Est1_UV	Est2_UV	Est3_UV	Est4_UV	Est5_UV	Est6_UV
N	168	168	159	168	168	168
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.220
Media	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00369
Mediana	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SD	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.02276
25 - 75 P	0.000 a 0.000	0.000 a 0.000	0.000 a 0.000	0.000 a 0.000	0.000 a 0.000	0.000 a 0.000

En cuanto a la Estación exterior, se puede ver en la figura 9a que los días 29 y 30 se presenta 6.158 y 6.199 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado. En la figura 9b el día 26 se tiene una media de 54.504 dB. De manera similar, entre los días 28 y 30 se notan los máximos de Temperatura con 19.402, 20.443 y 21.997 $^{\circ}\text{C}$ (ver figura 9c). De igual manera, los días 26 y 27 se registran los días con mayor Humedad Relativa con una media de 76.555 y 75.353% (ver figura 9d). Así mismo, el día 26 se tiene el máximo de Concentración de CO_2 y CO (figura 9e y figura 9f) con un promedio de 452.060 y 0.618 ppm, respectivamente. Las concentraciones de O_3 y NO, no tienen mayores fluctuaciones, ver ver figura 9g y figura 9h. Para más información estadística referirse a la tabla 4.

Figura 9

Diagramas de caja y bigotes con muescas para mediciones diarias en el exterior de la iglesia El Sagrario: a) Material Particulado 2.5, b) Potencia Acústica, c) Temperatura, d) Humedad Relativa, e) Concentración de CO_2 y f) Concentración de CO, g) Concentración de O_3 y h) Concentración de NO_2

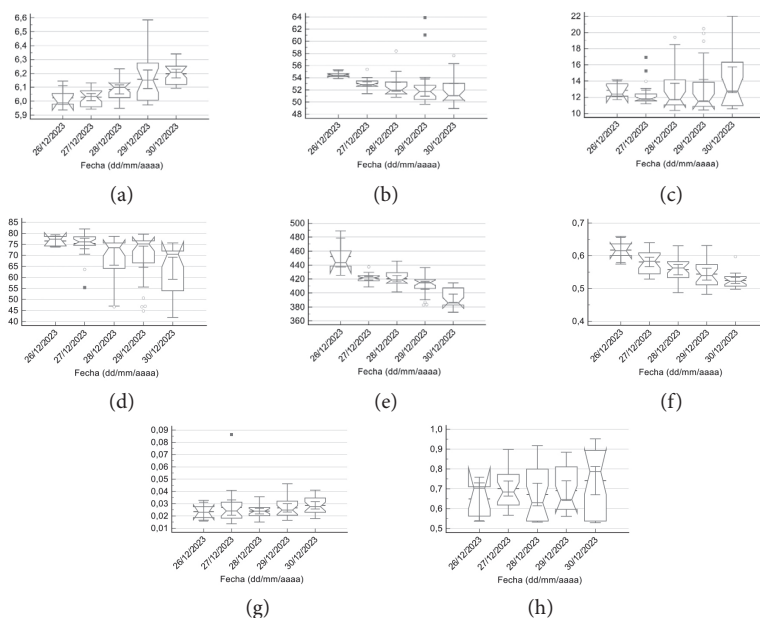


Tabla 4
Estadística resumen de Estación Exterior: mínimo, máximo, media, mediana, desviación estándar, percentiles

	PM					SON				
Fecha	26/12/2023	27/12/2023	26/12/2023	27/12/2023	26/12/2023	27/12/2023	26/12/2023	27/12/2023	26/12/2023	27/12/2023
N	5	24	5	24	5	24	5	24	5	24
Mínimo	5.978	5.943	5.978	5.943	5.978	5.943	5.978	5.943	5.978	5.943
Máximo	6.144	6.132	6.144	6.132	6.144	6.132	6.144	6.132	6.144	6.132
Media	6.023	6.030	6.023	6.030	6.023	6.030	6.023	6.030	6.023	6.030
Mediana	5.988	6.033	5.988	6.033	5.988	6.033	5.988	6.033	5.988	6.033
SD	0.07032	0.06281	0.07032	0.06281	0.07032	0.06281	0.07032	0.06281	0.07032	0.06281
25 - 75 P	5.979 a 6.057	5.960 a 6.076	5.979 a 6.057	5.960 a 6.076	5.979 a 6.057	5.960 a 6.076	5.979 a 6.057	5.960 a 6.076	5.979 a 6.057	5.960 a 6.076

	TEM				HUM					
Fecha	26/12/2023	27/12/2023	28/12/2023	29/12/2023	30/12/2023	26/12/2023	27/12/2023	28/12/2023	29/12/2023	30/12/2023
N	5	24	24	24	24	5	24	24	24	24
Mínimo	12.087	11.165	10.362	10.409	10.552	73.877	55.434	46.665	44.763	41.819
Máximo	14.184	16.934	19.402	20.443	21.997	78.675	81.972	78.614	79.602	75.640
Media	12.850	12.290	12.683	12.866	14.161	76.555	75.353	69.517	69.367	64.158
Mediana	12.369	11.793	11.727	11.456	12.742	77.331	76.111	73.410	75.158	70.499
SD	0.9286	1.3408	2.4578	3.1851	3.7757	2.2794	5.6582	9.4223	11.3308	11.8454
25 - 75 P	12.135 a 13.638	11.533 a 12.396	11.035 a 14.145	10.855 a 13.823	10.954 a 16.310	74.259 a 78.549	74.546 a 78.428	64.103 a 75.617	66.598 a 76.562	53.949 a 71.972

	CO ₂					CO				
Fecha	26/12/2023	27/12/2023	28/12/2023	29/12/2023	30/12/2023	26/12/2023	27/12/2023	28/12/2023	29/12/2023	30/12/2023
N	5	24	24	24	24	5	24	24	24	24
Mínimo	437.136	408.531	401.454	382.931	372.523	0.575	0.529	0.487	0.482	0.498
Máximo	489.271	437.488	445.816	436.603	414.302	0.659	0.640	0.631	0.631	0.597
Media	452.060	421.143	420.355	410.946	392.491	0.618	0.581	0.558	0.544	0.525
Mediana	443.754	421.449	418.684	414.708	385.914	0.616	0.583	0.563	0.540	0.522
SD	21.4680	6.2621	10.9950	13.5339	14.0336	0.03061	0.03456	0.03743	0.04310	0.02140
25 - 75 P	438.668 a 460.537	417.443 a 424.795	413.838 a 429.352	406.462 a 419.116	382.736 a 407.170	0.601 a 0.636	0.545 a 0.609	0.534 a 0.582	0.511 a 0.573	0.507 a 0.537

N02										
Fecha	26/12/2023	27/12/2023	28/12/2023	29/12/2023	30/12/2023	26/12/2023	27/12/2023	28/12/2023	29/12/2023	30/12/2023
N	5	24	24	24	24	5	24	24	24	24
Mínimo	0.0166	0.0136	0.0151	0.0165	0.0179	0.537	0.567	0.532	0.561	0.529
Máximo	0.0327	0.0863	0.0357	0.0463	0.0410	0.730	0.899	0.918	0.884	0.952
Media	0.0235	0.0269	0.0240	0.0266	0.0287	0.649	0.701	0.671	0.691	0.741
Mediana	0.0231	0.0241	0.0240	0.0248	0.0276	0.703	0.684	0.630	0.646	0.786
SD	0.006212	0.01481	0.005533	0.007960	0.007136	0.08817	0.09026	0.1345	0.1171	0.1678
25 - 75 P	0.0187 a 0.0275	0.0183 a 0.0313	0.0202 a 0.0269	0.0207 a 0.0321	0.0230 a 0.0347	0.563 a 0.710	0.618 a 0.773	0.537 a 0.799	0.597 a 0.811	0.538 a 0.894

Finalmente, en la figura 10, se puede observar el registro de una Estación 1 de monitoreo vibracional. Se presenta las aceleraciones en los tres ejes; no existe ningún movimiento representativo, por lo cual no se presentan todas las figuras. Adicionalmente, se puede observar el análisis estadístico en la tabla 5.

Figura 10

Representación multilínea de las aceleraciones registradas por la Estación 1 de Vibraciones

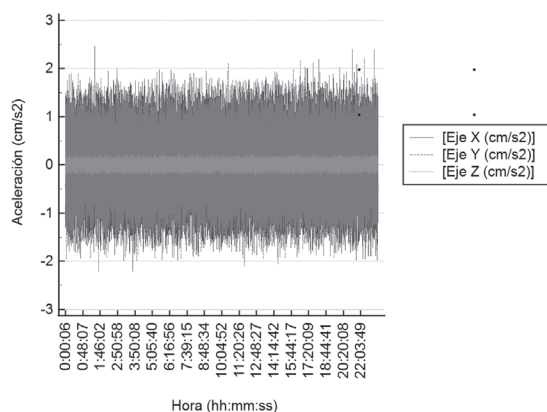


Tabla 5

Estadística resumen de Estación 1 de Vibraciones: mínimo, máximo, media, desviación estándar, percentiles

	Eje X	Eje Y	Eje Z
N	413916	413916	413916
Mínimo	-2.217	-2.207	-0.335
Máximo	2.473	2.400	0.276
Media	-0.0175	-0.00188	-0.000208
SD	0.4880	0.5082	0.06687
25 - 75 P	-0.347 a 0.313	-0.345 a 0.342	-0.0451 a 0.0449

Análisis y discusión

Es importante destacar que conocer el clima interior en los edificios patrimoniales es fundamental para su adecuada conservación y sostenibilidad. En países de primer mundo, los sistemas de monitoreo son cada vez más frecuentes, lo cual no sucede en países menos favorecidos ya que, este monitoreo conlleva a un alto costo asociado con los sistemas comerciales o licenciados. A esto se suma, los problemas de manejo de equipo, soporte técnico, falta de flexibilidad en la programación y adaptabilidad de los sistemas a ciertas características únicas de cada bien patrimonial.

Con base en esto, en España se desarrollaron 15 estaciones de microclima con hardware de código abierto, las cuales se colocaron en la Mezquita-Catedral de Córdoba; se buscó evaluar el comportamiento de la temperatura interior y la humedad relativa en relación con las condiciones climáticas exteriores, el horario de atención al público y el diseño interior (Mesas-Carrascosa *et al.*, 2016b). El número de estaciones se corresponde con el tamaño del edificio (130 m x 50 m), mientras que, en el caso piloto, la iglesia de El Sagrario, el tamaño es significativamente menor (40 m x 15 m), haciendo que el número de estaciones utilizadas en esta investigación sea menor.

Por otro lado, el monitoreo a largo plazo de los parámetros ambientales es de interés en términos de conservación preventiva y reducción de los costos de futuras intervenciones. Es importante destacar que, existen estudios para la monitorización de los microclimas dentro de los bienes patrimoniales, como el realizado por Varas-Muriel y Fort (2018) en la iglesia de Nuestra Señora de la Asunción de Madrid. El edificio al emplazarse en un territorio sujeto a cuatro estaciones usa sistemas de calefacción y refrigeración para garantizar el confort de los visitantes, los cuales, a su vez, pueden poner en peligro los bienes patrimoniales al calentar o enfriar únicamente las zonas de baja o sobre ocupación en los distintos momentos del año. Esto no sucede en la iglesia de El Sagrario, ya que Cuenca goza, prácticamente todo el año de un clima primaveral cuya temperatura promedio es 12.4 °C (Climate-data, 2022). Pese a ello,

es importante realizar el monitoreo, ya que existen épocas de sobreocupación como la reciente exposición del denominado Pesebre más grande de Latinoamérica (Marín, 2023), entre el 20 de octubre y el 21 de enero de 2024, el cual congregó 98 288 visitantes.

Un trabajo similar realizado por Silva *et al.* (2020) presenta un conjunto de prototipos basados en la tecnología Arduino para medir temperatura, humedad relativa y ventilación interior de una iglesia declarada como Patrimonio de la Humanidad, el Monasterio de los Jerónimos de Lisboa (Portugal). Esta investigación buscaba reducir los costos de monitorización de los edificios patrimoniales, sin comprometer la robustez de los sistemas de monitoreo. Paralelamente, se abordaron cuestiones relacionadas con la importancia de calibrar los sensores, lo cual es un gran reto, la frecuencia de registro, la duración de los periodos de monitoreo y la ubicación de los sensores. La evaluación del clima interior se realizó a partir de análisis estadístico y gráfico para caracterizar el clima típico en el interior del edificio y el CO₂.

Muchos estudios se centran en la monitorización de datos, pero no consideran los sistemas de almacenamiento o comunicación. Así, Ni *et al.* (2021) indican que, el monitoreo del ambiente interior de los edificios históricos ayuda a la identificación de riesgos potenciales, proporcionando pautas para mejorar su mantenimiento regular y preservación. Sin embargo, la mayoría de los sistemas de monitoreo existentes propuestos para edificios históricos no son para fines generales, el gran problema de los sistemas licenciados. Además, el monitoreo es un proceso a largo plazo que exige un sistema recursos informáticos y de almacenamiento estables y escalables. Por lo mismo, recomiendan la utilización de la arquitectura de la Internet de las cosas, la cual se evidencia en el presente trabajo.

Con respecto a los datos obtenidos en el caso de la iglesia de El Sagrario se puede observar que los niveles de material particulado (figura 9a y tabla 4, subsección PM) tienen diferencias de concentración entre un espacio y otro, debido a la forma de movimiento del aire entre las puertas de acceso, lo que causa un desplazamiento del material particulado a los

espacios que se encuentran lejanos o tangenciales a estos accesos, como es el caso del Altar de la Capilla; entre los accesos se generan un corredor de ventilación al momento de abrir las puertas. En este sentido, es necesario evaluar la necesidad de definir condiciones de ventilación en espacios que se mantengan abiertos al momento de abrir las puertas. En las mediciones del exterior, no se evidencian niveles mayores a los $20\mu\text{g}/\text{m}^3$, máximo recomendado por la OMS (2006), pero en espacios interiores es importante continuar con el seguimiento para identificar cambios súbitos de niveles que puedan ser causados por eventos naturales o antrópicos.

En el caso del nivel de ruido (figura 9b y tabla 4, subsección SON) en las estaciones de las Capillas se debe considerar que se está superando los 55dB (sin incluir el tiempo de exposición), recomendados por la OMS (Vivanco Font, 2022). A su vez, en las mediciones de la estación exterior es incluir la polución sonora; como se observa, un día se alcanzó 54dB, lo que hace necesario identificar cuál es la fuente que causó este nivel de ruido, ya que la exposición constante y prolongada a niveles mayores a los 55dB (sin considerar tiempo de exposición) a largo plazo puede generar pérdida de audición en las personas.

En el caso de las concentraciones de humedad (figura 9d y tabla 4, subsección HUM) se evidencia que, en el Altar y Nave Central sobre pasa los máximos recomendados por la (EPA, 2016) del 50 %, por lo que existe el riesgo de generación de hongos debido a la condensación de agua en el ambiente; esto afecta a mediano y largo plazo a los acabados y, dependiendo al tiempo de exposición, también a la salud de sus ocupantes. Para mitigar los riesgos que presentan estos niveles de humedad, es necesario definir sistemas de ventilación que se activen conjuntamente con la apertura de las puertas, y en el caso de que la iglesia de El Sagrario esté cerrada, considerar la necesidad de un sistema de ventilación secuencial programada conforme la época del año. En el exterior se registra humedad superior al 50 %, lo que significa riesgo de generación de hongos, por lo que es recomendable la protección de elementos constructivos de madera y tierra.

Finalmente, las concentraciones marcadas en ambientes interiores y en el exterior de CO₂ (figura 9e y tabla 4, subsección CO₂), hasta el momento están enmarcados en estándares admisibles, ya que se recomienda por parte de Occupational Safety and Health Administration, OSHA, que no superen las 700 ppm en espacios interiores que cuenten con capacidad reducida o nula de personas, y que no sea mayor a 1000 ppm en caso de alta concentración de personas (GSS, 2013). Por su parte, la temperatura (figura 9c y tabla 4, subsección TEM) en los ambientes se puede considerar estable, debido a la poca variación que existen entre las mediciones, pese a ello, a futuro es importante verificar si estas variaciones también son constantes cuando están abiertas las puertas de acceso, con niveles de concentración de personas y de acuerdo con la época del año.

Conclusiones y recomendaciones

Se presentó el desarrollo de un sistema para monitorizar las variables ambientales y vibracionales en edificios patrimoniales mediante el uso de IoT. Como una primera experiencia ha sido instalado en la iglesia de El Sagrario de Cuenca. Las características del sistema, como los bajos costes de adquisición y la facilidad de personalización, pueden eliminar los obstáculos asociados a los sistemas licenciados. La información descrita en el presente trabajo muestra el comportamiento de los diferentes espacios de este bien patrimonial por el lapso de una semana, pero deja abierta la puerta a investigaciones en curso para ver las afecciones que sufre el bien inmueble por ocupación o cambios de usos para los cuales fue construida. Es importante presentar estudios que permitan relacionar las condiciones climáticas exteriores e internas. Además, de realizar un seguimiento de posibles problemas ya detectados y cómo estos están evolucionando con base en la información obtenida.

Los resultados de estas técnicas han revelado cómo los parámetros Humedad Relativa y Temperatura tienen un patrón de comportamiento particular. Las zonas más cercanas a las puertas presentan menor temperatura y humedad, a medida que se aproxima al interior, estos paráme-

tros aumentan. Además, estas diferencias son mayores cuando el edificio patrimonial está abierto a los visitantes. Una vez cerrado, se reducen. También se observó que las condiciones climáticas exteriores influyen directamente en las condiciones interiores y son más pronunciadas en las áreas más cercanas a la salida. Por ejemplo, la concentración de Material Particulado medido por la Estación 2 debe ser analizado, pues la capilla se encuentra al costado de un corredor hacia el área administrativa y el flujo de aire podría estar causando la elevación en las concentraciones. Todo el sistema se ha desarrollado utilizando plataforma DiY y software abierto.

En el futuro se podrán instalar nuevos sensores para medir otras variables, como concentración de SO_2 en el aire, CO , entre otros, y su relación con el volumen de visitantes, para lo cual se desea realizar un sistema automático para establecer el nivel de ocupación del bien patrimonial mediante técnicas de visión artificial.

Agradecimientos

Esta investigación se realizó como parte del trabajo del grupo de investigación “Sistemas Embebidos y Visión Artificial en Ciencias Arquitectónicas, Agropecuarias, Ambientales y Automática (SEVA4CA)” dentro del proyecto de investigación titulado “Evaluación y Monitoreo de Bienes Inmuebles Patrimoniales IoT. Etapa 1” perteneciente al Laboratorio de Robótica, Automatización, Sistemas Inteligentes y Embebidos (RobLab) de la Universidad Católica de Cuenca.

Referencias bibliográficas

- Aguilar Carbone, J. A., González Herrera, R., Guerrero Juárez, V. y Jara Díaz, M. (2020). Comportamiento de templos coloniales en el sismo del 7 de septiembre de 2017 en Chiapas. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 102(102), 26-41. <https://doi.org/10.18867/ris.102.502>
- Alcántara, M. (2018). *Arte y patrimonio cultural*. 1-100. https://doi.org/10.14201/0aq0251_3

- Arizaga, D. (1999). El patrimonio cultural en los procesos de descentralización. *Revista Ciudad Alternativa*, 14, 155.
- Campiani, A., Lingle, A. y Lercari, N. (2019a). Analysis and Heritage Conservation: Leveraging 3-D Data and GIS for Monitoring Earthen Spatial Analysis and Heritage Conservation: Leveraging 3-D Data and GIS for Monitoring Earthen Architecture Corresponding author. *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.02.011>
- Campiani, A., Lingle, A. y Lercari, N. (2019b). Spatial analysis and heritage conservation: Leveraging 3-D data and GIS for monitoring earthen architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 39, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.02.011>
- Climate-data. (2022). *Clima CUENCA: Temperatura, Climograma y Tabla climática para CUENCA*. <https://bit.ly/4dezXln>
- Enfoque, U. (2014). Propuesta de Mapa de Riesgos de Bienes Patrimoniales Inmuebles expuestos a Amenazas de Origen natural (Heritage Assets Exposed to Natural Hazards. A Risk Map Proposal). *Enfoque UTE*, 5(1), 30-48.
- EPA. (2016). *Guía para el Control de la Humedad en el Diseño, Construcción y Mantenimiento de Edificaciones*. <https://bit.ly/4fD71ll>
- Fosca, D., Pórcel, P., Zonno, G., Castañeda, B. y Aguilar, R. (2019). Implementation of a Web Platform to Present Real Time Dynamic Monitoring Data from Heritage Structures. En *RILEM Bookseries*, 18, 2245-2253). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3_241
- Galán Huertos, E., Bernabé González, J. (2006). La aplicación de la Evaluación de Impacto Ambiental en el Patrimonio Monumental y el Desarrollo Sostenible de las Ciudades. *Revista de Enseñanza Universitaria: Vol. Extraordin* (pp. 123-140).
- GSS. (2013). *Environmental Monitoring Solutions*. www.epa.gov/iaq
- ICOMOS. (1965). Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y Sitios (Carta De Venecia 1964). *International Council on Monuments and Sites*.
- ICOMOS. (2011, noviembre 1). *The Athens Charter for the Restoration of Historic Monuments - 1931 - International Council on Monuments and Sites*. The Athens Charter for the Restoration of Historic Monuments-1931. <https://bit.ly/46ACMHH>
- INPC. (2013). Guía metodológica para la salvaguardia del Patrimonio Cultural Inmaterial. En *Cimarronesperuorg* (Vol. 27).
- Maksimović, M. y Cosović, M. (2019, mayo 16). Preservation of Cultural Heritage Sites using IoT. *2019 18th International Symposium INFOTEH-*

- JAHORINA, INFOTEH 2019 - *Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/INFOTEH.2019.8717658>
- Marín, J. (2023, septiembre 22). Cuenca reclama tener el pesebre “más grande de Latinoamérica”. *Expreso*. <https://bit.ly/3WWixRu>
- Mesas-Carrascosa, F. J., Verdú Santano, D., de Larriva, J. E. M., Ortiz Cordero, R., Hidalgo Fernández, R. E. y García-Ferrer, A. (2016a). Monitoring heritage buildings with open source hardware sensors: A case study of the mosque-cathedral of Córdoba. *Sensors (Switzerland)*, 16(10), 1620. <https://doi.org/10.3390/s16101620>
- Mesas-Carrascosa, F. J., Verdú Santano, D., de Larriva, J. E. M., Ortiz Cordero, R., Hidalgo Fernández, R. E. y García-Ferrer, A. (2016b). Monitoring heritage buildings with open source hardware sensors: a case study of the Mosque-Cathedral of Córdoba. *Sensors* 2016, 16(10), 1620. <https://doi.org/10.3390/S16101620>
- Nallely, B. y Nava, Z. (1979). Carta de Burra: Carta para la Conservación de Lugares de Valor Cultural. (1979). «*Patrimonio*»: *Economía Cultural y Educación para la Paz (MEC-EDUPAZ)*, 1(1), 190-197. <https://doi.org/10.22201/FPSI.20074778E.1.1.1.30708>
- Ni, Z., Liu, Y., Karlsson, M. y Gong, S. (2021). A sensing system based on public cloud to monitor indoor environment of historic buildings. *Sensors* 2021, 21(16), 5266. <https://doi.org/10.3390/S21165266>
- OMS. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*.
- Ortega-Ordaz, A. A. y Ortega-Ordaz, A. A. (2020). Technoheritage 2019, TechnArt 2019, AIC 47 TH Annual Meeting: la conservación en México en perspectiva con el mundo. *Intervención (México DF)*, 11(21), 328-348. <https://doi.org/10.30763/INTERVENCION.230.V1N21.09.2020>
- Ortiz, P., Antunez, V., Martín, J. M., Ortiz, R., Vázquez, M. A. y Galán, E. (2014). Approach to environmental risk analysis for the main monuments in a historical city. *Journal of Cultural Heritage*, 15(4), 432-440. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.07.009>
- Ortiz, R. y Ortiz, P. (2016). Vulnerability index: a new approach for preventive conservation of monuments. *International Journal of Architectural Heritage*, 10(8), 1078-1100. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1186758>
- Perez Cotrina, D. (2017). Facultad de Ingeniería Facultad de Ingeniería. *Ucv*, 358.
- Rovella, N., Aly, N., Comite, V., Randazzo, L., Fermo, P., Barca, D., Álvarez de Buer-go, M. y La Russa, M. F. (2021). The environmental impact of air pollution

- on the built heritage of historic Cairo (Egypt). *Science of the Total Environment*, 764, 142905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142905>
- Silva, H. E., Coelho, G. B. A. y Henriques, F. M. A. (2020). Climate monitoring in World Heritage List buildings with low-cost data loggers: The case of the Jerónimos Monastery in Lisbon (Portugal). *Journal of Building Engineering*, 28, 101029. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.101029>
- Uva, G., Sangiorgio, V., Ruggieri, S. y Fatiguso, F. (2019). Structural vulnerability assessment of masonry churches supported by user-reported data and modern Internet of Things (IoT). *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 131, 183-192. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.08.014>
- Valeria, C., Zapata, A., Fernanda, G., Bernal, O., Palacios, D. M., Martha, M. y León, V. P. (2015). *Aplicación de la Metodología*. (Tesis previa a la obtención del Título de Arquitecto). Universidad de Cuenca, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- Van Balen, K. (2009). *Conservación Preventiva en el contexto internacional de la red PRECOM3OS*. II Encuentro PRECOM3OS Seminario Taller de Tecnologías y Restauración de Obras en Tierra.
- Varas-Muriel, M. J. y Fort, R. (2018). Microclimatic monitoring in an historic church fitted with modern heating: Implications for the preventive conservation of its cultural heritage. *Building and Environment*, 145, 290-307. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.08.060>
- Vidal, F., Vicente, R. y Mendes Silva, J. (2019). Review of environmental and air pollution impacts on built heritage: 10 questions on corrosion and soiling effects for urban intervention. *Journal of Cultural Heritage*, 37, 273-295. Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.11.006>
- Vivanco Font, E. (2022). *Regulación de ruido ambiental*.
- Žarnić, R., Rajčić, V. y Skordaki, N. (2015). A contribution to the built heritage environmental impact assessment. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(5W3), 389-394. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-389-2015>