

Modelo computacional para el análisis y predicción de la circulación de aire en el interior de la Catedral de Santiago de Compostela

Jorge Mira Pérez

Catedrático de Electromagnetismo
Universidade de Santiago de Compostela

Alberto Pérez Muñuzuri

Profesor titular del Área de Física de la Materia Condensada
Universidade de Santiago de Compostela

Alberto Otero Cacho

Investigador asociado
Centro de Investigación y Tecnología Matemática de Galicia

Modelo computacional para el análisis y predicción de la circulación de aire en el interior de la Catedral de Santiago de Compostela ⁽¹⁾

Jorge Mira Pérez

Catedrático de Electromagnetismo
Universidade de Santiago de Compostela

Alberto Pérez Muñuzuri

Profesor titular del Área de Física de la Materia Condensada
Universidade de Santiago de Compostela

Alberto Otero Cacho

Investigador asociado
Centro de Investigación y Tecnología Matemática de Galicia

Resumen

Entre los factores que pueden influir en la integridad y durabilidad de numerosas obras que integran el patrimonio cultural, la temperatura y la humedad destacan como dos variables ambientales críticas que merecen una atención especial debido a su impacto significativo en la degradación de materiales históricos y la estabilidad de las estructuras patrimoniales. Con el objetivo de contribuir a esta conservación y monitoreo del patrimonio se ha creado una herramienta computacional que permite conocer la dinámica del aire interior en un monumento, así como calcular un gran número de variables que podrán ser utilizadas para diseñar estrategias de ventilación que contribuyan a una mejor conservación del patrimonio histórico. La herramienta tiene un marcado carácter predictivo y podrá ser usada por el personal técnico encargado de la conservación del patrimonio para tomar decisiones antes de que factores como la humedad produzcan daños materiales en el monumento.

Palabras clave

Patrimonio cultural, Contaminación del medio ambiente, Medio ambiente, Conservación, Conservación de edificios, Obras de conservación, Galicia

ÍNDICE:

I. Introducción

II. Metodología

1. Obtención de la geometría en 3D de la Catedral de Santiago
 - A) Singularidades en la construcción del modelo 3D (problemática)
2. Modelo numérico
 - A) Geometría 3D
 - B) Malla
 - C) Configuración del modelo
 - D) Condiciones de contorno

III. Resultado de la modelización matemática

1. Simulación 1
2. Simulación 2
3. Simulación 3
4. Comparación de los resultados obtenidos en los sensores virtuales del modelo numérico con aquellos registrados por los sensores físicos localizados en la Catedral

IV. Conclusiones

Bibliografía

I. INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento del aire en espacios públicos ha sido siempre un área de interés científico. Al margen de otras consideraciones, unos niveles altos de CO₂ implican una serie de efectos no deseados que se manifiestan típicamente en entornos laborales o en espacios con afluencia de público.

La aparición de la COVID-19 reforzó la necesidad de realizar este tipo de estudios, especialmente después de confirmarse la transmisión aérea del coronavirus, dado que un factor clave para controlar la propagación del SARS-CoV-2 es la mejora de la calidad del aire interior, para lo cual se han propuesto estrategias como ventilaciones intermitentes calculadas (Muñuzuri, Otero-Cacho y Mira, 2022). Más allá de cuestiones sanitarias o de la calidad del aire, los volúmenes de aire interior influyen en la

conservación del propio edificio. Así, por ejemplo, los niveles de humedad (responsables de gran parte de ese deterioro si nos limitamos al caso concreto de Galicia y Santiago de Compostela) dependen en gran medida de la temperatura y de la velocidad del flujo de aire sobre las superficies del edificio.

La conservación del patrimonio cultural es una preocupación fundamental en el mundo contemporáneo, donde la preservación de objetos, estructuras y edificios históricos es esencial para mantener viva la identidad y la historia de una sociedad. Entre los numerosos factores que pueden influir en la integridad y la durabilidad del patrimonio cultural, la temperatura y la humedad se destacan como dos variables ambientales críticas que merecen una atención especial debido a su impacto significativo en la degradación de materiales históricos y la estabilidad de las estructuras patrimoniales. La humedad atmosférica, en sus diferentes formas (absoluta y relativa), ha sido identificada como un factor clave en la conservación del patrimonio cultural. Investigaciones como las realizadas por Stanaszek-Tomal (2020) han demostrado que la exposición prolongada a niveles elevados de humedad relativa puede promover la proliferación de microorganismos, como hongos y bacterias, que pueden causar daños irreversibles en materiales orgánicos e inorgánicos. La acción biológica resultante puede conducir a la descomposición de estructuras de madera, la formación de manchas en pinturas y la degradación de textiles históricos. Además, la fluctuación de la humedad relativa puede tener efectos adversos en la estabilidad dimensional de los materiales patrimoniales. Algunos estudios (Wang, Cao y Liu, 2021; Zhang *et al.*, 2021) han demostrado que los cambios bruscos en la humedad pueden dar lugar a movimientos y deformaciones en materiales como la madera, la piedra y el yeso, lo que puede provocar grietas, separaciones y pérdida de integridad estructural.

Por otro lado, la humedad absoluta también puede desempeñar un papel significativo en la conservación del patrimonio cultural, especialmente en el caso de materiales porosos como la piedra y el ladrillo. Oguchi y Yu (2021) han revelado que la presencia de agua en forma líquida dentro de los poros de estos materiales puede contribuir a procesos de deterioro como la disolución, la cristalización de sales y la expansión por congelación, lo que puede provocar la desintegración gradual de las estructuras.

La temperatura es otro factor ambiental crítico que puede influir significativamente en la conservación del patrimonio cultural. La temperatura ambiente y las fluctuaciones térmicas pueden afectar a una amplia gama de procesos de degradación y alteración en materiales históricos. Investigaciones recientes han demostrado que las altas temperaturas pueden acelerar procesos de deterioro como la oxidación, la descomposición química y la volatilización de compuestos orgánicos en materiales patrimoniales.

Además, la temperatura puede influir en la tasa de reacciones químicas que causan la degradación de materiales. Estudios de modelado han sugerido que el aumento de la temperatura puede aumentar la velocidad de reacciones como la hidrólisis, la descomposición de compuestos orgánicos y la cristalización de sales, lo que puede acelerar la desintegración de materiales en elementos patrimoniales.

Por otro lado, las fluctuaciones térmicas pueden tener efectos adversos en la estabilidad dimensional de los materiales, especialmente en estructuras compuestas por diferentes materiales con coeficientes de expansión térmica diferentes. Investigaciones como las realizadas por McAllister, Warke y McCabe (2017) han demostrado que los cambios bruscos de temperatura pueden generar tensiones internas en materiales como la piedra y el hormigón, lo que puede dar lugar a grietas, separaciones y pérdida de integridad estructural.

Evidentemente, las condiciones climáticas exteriores juegan un papel determinante, siendo su influencia y acceso/salida al/desde volumen interior del recinto una cuestión de primer orden. El conocimiento del comportamiento del aire en el espacio interior de la Catedral de Santiago y la posibilidad de prever con tiempo suficiente medidas destinadas a regularlo o a modificarlo es necesario para el diseño, desarrollo e implantación de un plan efectivo de conservación preventiva de la Catedral y del patrimonio artístico que contiene, entre el que destaca el Pórtico de la Gloria.

En este punto incide el trabajo aquí presentado, desde una línea novedosa como es la de la modelización computacional de los flujos de aire en el interior de la Catedral de Santiago. Un enfoque diferente, desde un área distinta de las habituales y que además es pionero, ya que con la bibliografía de la que disponemos parece que esta línea de trabajo no se había puesto en práctica hasta este momento.

El cuidado del patrimonio cultural material es una necesidad que requiere de la colaboración de múltiples áreas de conocimiento. De hecho, la Comisión de Cultura y Educación del Parlamento Europeo, en su informe de 2014 *Hacia un enfoque integrado del patrimonio cultural europeo*, sugiere a los Estados miembros de la UE "apoyar directamente una visión integral de la investigación y la innovación", apoyar "los sectores de la investigación aplicada a la preservación y valorización del patrimonio cultural", valorar "el potencial de los proyectos de investigación interdisciplinarios para la conservación del patrimonio cultural" e incluso "investigar más detalladamente los múltiples efectos del cambio climático en el patrimonio cultural y elaborar medidas para contrarrestarlo".

Por todo esto, para alcanzar una mayor eficacia en la ejecución de actuaciones, se diseñó hace ya casi dos años el proyecto que se expondrá a continuación, que tenía como objetivo principal la construcción de un modelo matemático que pudiese describir correctamente la dinámica de flujos de aire en el interior de la Catedral de Santiago.

De este modo, este gemelo digital de la Catedral de Santiago permitirá realizar pruebas de diferentes situaciones físicas y climáticas y tendrá un marcado carácter predictivo, de forma que el personal técnico encargado de su conservación pueda estar preparado frente a diferentes contingencias.

II. METODOLOGÍA

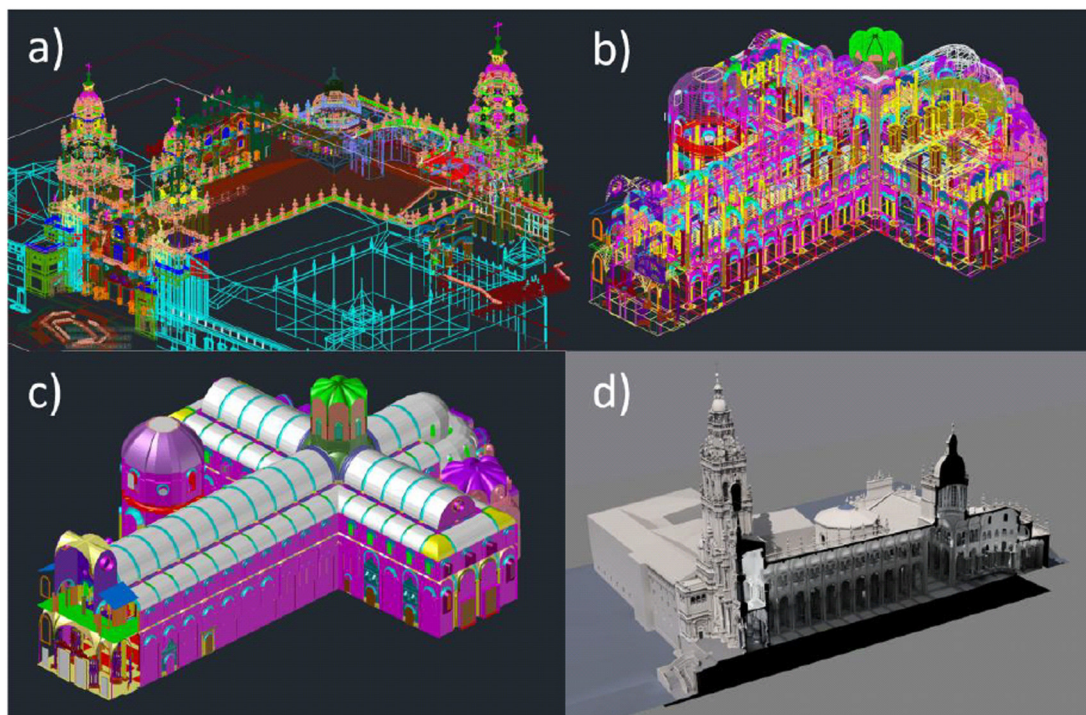
El proceso de diseño del modelo matemático desarrollado para el estudio del flujo de aire en el interior de la Catedral de Santiago se dividió en dos grandes bloques. Por un lado, se realizó una reconstrucción en 3D de la geometría interior de la Catedral ocupada por aire y, una vez realizada esta reconstrucción, se definió el modelo numérico a partir del cual es posible obtener la distribución de corrientes de aire en el interior de la Catedral.

1. Obtención de la geometría en 3D de la Catedral de Santiago

El objetivo final de este proceso fue la obtención del volumen interior de la Catedral de Santiago ocupado por aire. Para poder obtenerlo de forma precisa, en primer lugar, se realizó una reconstrucción en 3D de la cara interna de los cerramientos de la Catedral para, a continuación, poder extraer el volumen de aire encerrado.

La primera geometría en 3D de la Catedral de la que se dispuso correspondía a un modelo elaborado por Hernández y Barneche (2014), generado mediante mallas poligonales que corresponden, por una parte, a la piel exterior del templo y, por otra, a la de su interior. Esta geometría previa, realizada con otros fines, fundamentalmente museológicos y de difusión, se realizó empleando *software* de diseño asistido por ordenador, aplicando criterios de sintaxis formal arquitectónica en la creación de todos los elementos y atendiendo a sus reglas estilísticas de trazado (Barneche *et al.*, 2012). Los detalles se muestran en la Figura 1.

Figura 1. Vistas del modelo disponible. a) Alámbrica exterior. b) Alámbrica interior. c) Modelo sombreado interior. d) Sección de la composición de ambos modelos



Fuente: Elaboración propia

A pesar de la buena apariencia del modelo disponible, este no resultaba adecuado para los requisitos del presente trabajo, que implican contar con un único espacio con estrictas características de cierre (*watertight*) no requeridos en el modelo anterior y que una malla poligonal no puede garantizar.

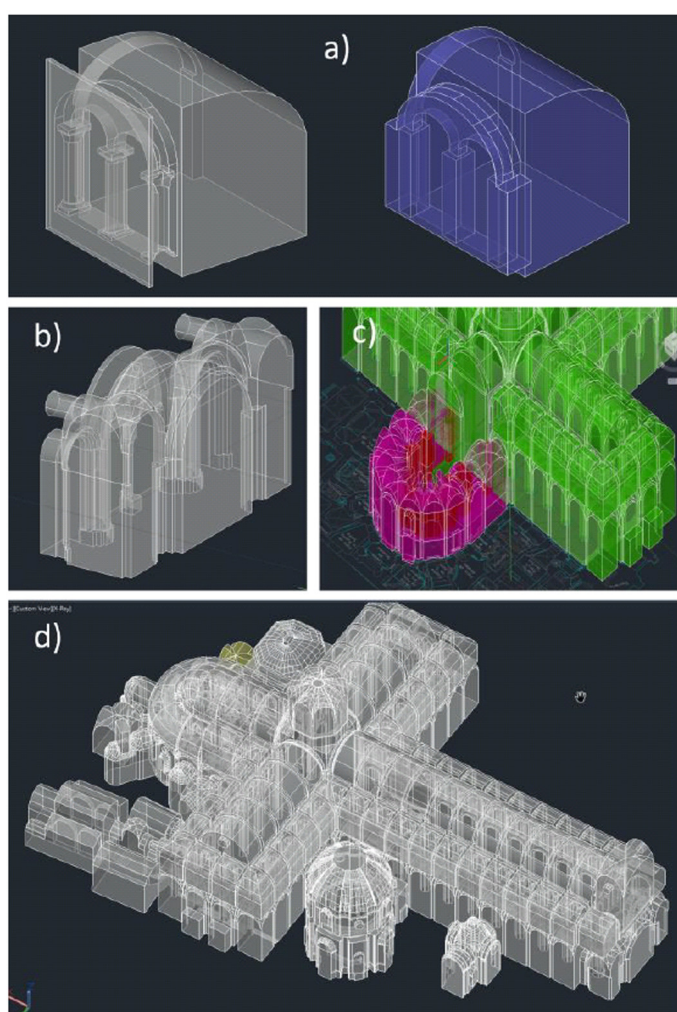
Por este motivo, se decidió utilizar el modelo de superficies poligonales disponible, únicamente como referencia métrica para la creación de un nuevo modelo *ad hoc*, generado esta vez mediante técnicas de modelado de sólidos. La razón es que la técnica de modelado de sólidos garantiza varios requisitos necesarios para la simulación:

1. Partición binaria del espacio: cada punto del modelo recibe la caracterización de ser un punto dentro del sólido o fuera de él. Este requisito permite definir el dominio de la simulación.
2. Consistencia tridimensional: el modelo sólido no contiene objetos no volumétricos como superficies o líneas sueltas.
3. Orientabilidad: toda superficie que limita el modelo está correctamente orientada para que el sistema pueda determinar el lado interior y exterior de cada cara.

El nuevo modelo, aunque visualmente es similar, a la vez es muy diferente en su generación y características y parte no de la determinación del espacio encerrado entre varias superficies que se cruzan, sino del análisis, caracterización y modelado directo de

la geometría de la forma del hueco existente entre los múltiples elementos que limitan cada zona que se vaya a tratar. De esta manera, el nuevo modelo se define como la suma de pequeños volúmenes correspondientes a cada uno de los componentes espaciales, muchos de ellos modulares y repetidos, que en conjunto constituyen el espacio vacío del templo (Figura 2). Las zonas singulares fueron objeto de un tratamiento especial.

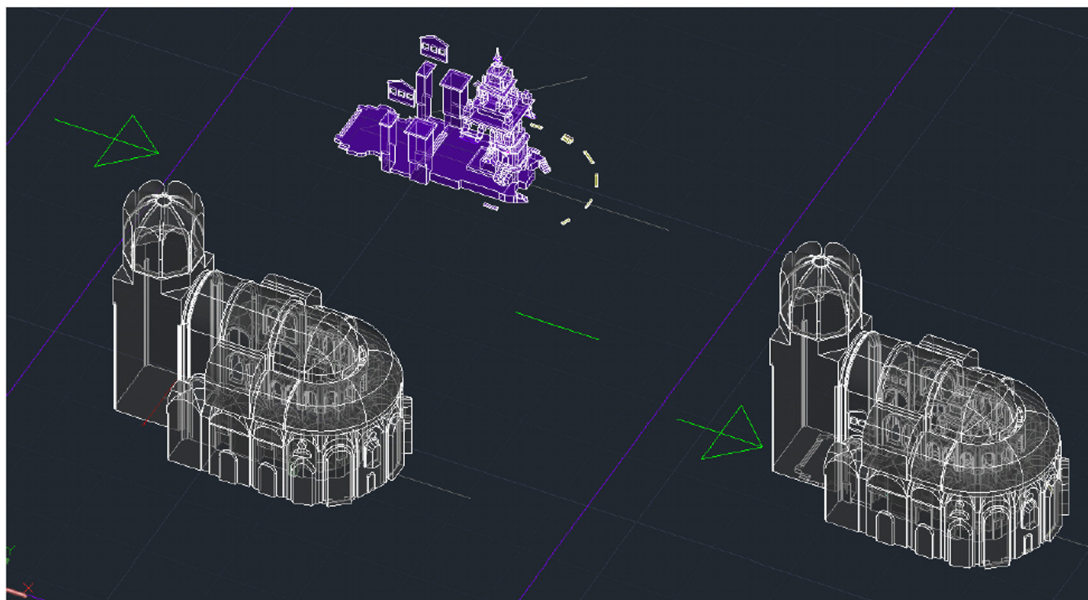
Figura 2. a) Ejemplo de diferentes versiones del modelado sólido del espacio de un módulo del triforio. b) Volumen de aire del Pórtico de la Gloria. c) Desarrollo de la girola. d) Modelo sólido completo del templo



Fuente: Elaboración propia

En el caso de áreas de particular complejidad, como el altar, que ocupa el espacio de la cabecera, los volúmenes simplificados de sus componentes fueron modelados como elementos sólidos sustractivos que se restan del espacio que los alberga (Figura 3).

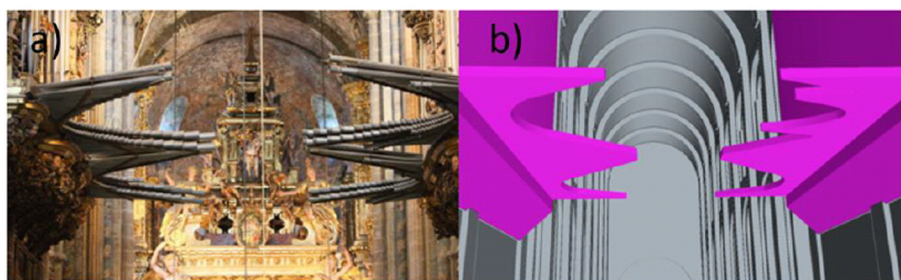
Figura 3. Modelado del espacio de la cabecera como sustracción del volumen del altar respecto del espacio del aire que lo aloja



Fuente: Elaboración propia

Para poder obtener una geometría 3D que pueda ser utilizada por el *software* CFD (*computational fluid dynamics* [dinámica de fluidos computacional]) y resolver las ecuaciones gobernantes del flujo, es necesario simplificar la morfología de los muros internos de la Catedral y de ciertos elementos singulares. En la Figura 4 se puede observar la simplificación realizada en el órgano, en la que los elementos tubulares son sustituidos por una estructura continua que, sin embargo, reproduce fielmente el contorno externo de la estructura, siendo este el único aspecto que influye en la circulación del aire. Cabe señalar que todas las simplificaciones realizadas en la geometría tienen como objetivo la correcta ejecución del algoritmo de resolución y que, en ningún caso, suponen una pérdida de precisión a la hora de analizar las variables físicas en el interior del conjunto catedralicio. Además, la eliminación de determinadas aristas y la modificación de algunos elementos internos contribuyen decisivamente a acelerar el proceso de simulación y evitar problemas de convergencia del algoritmo, uno de los principales riesgos a los que los autores se tuvieron que enfrentar en el desarrollo de este trabajo.

Figura 4. a) Geometría real del órgano. b) Simplificación realizada con la ayuda de *software* CAD (*computer aided design*)

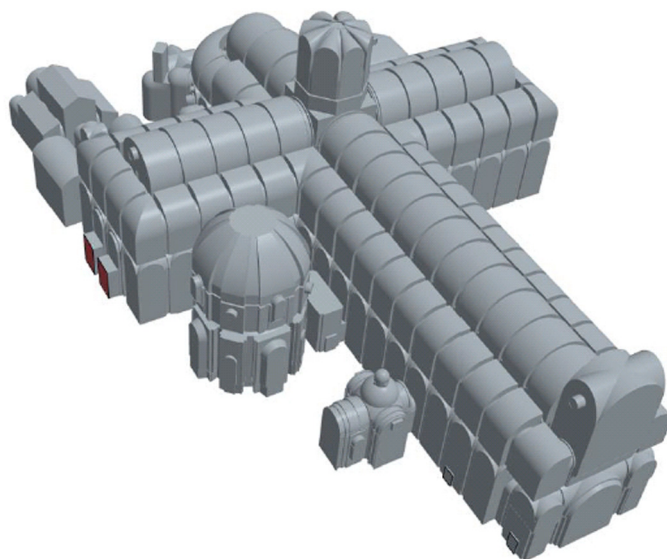


Fuente: Elaboración propia

A partir de esta geometría 3D de los cerramientos y elementos interiores más representativos de la Catedral se obtiene una geometría 3D formada únicamente por el espacio interior ocupado por el aire. Este es un dominio que se considerará de interés en este proyecto y donde se resolverán las ecuaciones gobernantes del flujo y se analizarán variables físicas como la temperatura o la humedad.

La Figura 5 muestra una representación del volumen interior de la Catedral ocupado por aire en la que se puede distinguir fácilmente cada uno de los espacios que la componen (capillas, girola, etc.).

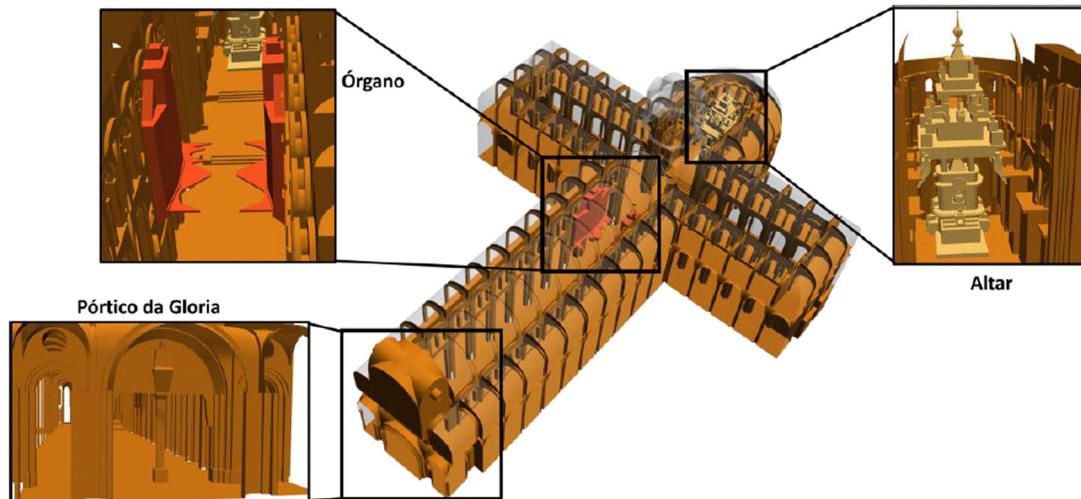
Figura 5. Representación del volumen interior de la Catedral ocupado por aire. La interfaz de contacto entre el volumen de aire confinado y los muros de la Catedral está representada en gris



Fuente: Elaboración propia

Dentro de esta superficie de contacto es posible distinguir cada una de las subestructuras que conforman la Catedral, como el altar o el Pórtico de la Gloria (véase Figura 6).

Figura 6. Detalle interior con algunas de las subestructuras que conforman la geometría final del complejo catedralicio



A) Singularidades en la construcción del modelo 3D (problemática)

Como ya se ha mencionado, para el diseño de la geometría se utiliza el *software* de diseño asistido por ordenador AutoCAD. El modelo sólido creado en AutoCAD, almacenado en su formato nativo.DWG, no es válido para ser ingresado en el *software* CFD, por lo que es necesario realizar una conversión de esta geometría a otro formato, siendo formatos soportados por el *software*.stl,.step,.iges,.x_by.x_t entre otros.

Para exportar la geometría en el formato óptimo, se utilizan varias estrategias:

1. En un primer momento, se trata de utilizar el conversor nativo de AutoCAD y exportar el modelo en formato sólido (.step,.iges, que son dos de los formatos más utilizados y que mejores resultados dan a la hora de conseguir el equilibrio entre rendimiento y precisión en el ecosistema de *software* CFD). Al realizar este tipo de conversión, se observan errores en la geometría del archivo de salida al realizar la importación, tales como superficies abiertas, superposición de caras, presencia de líneas, etc., por lo que se decidió utilizar otra estrategia (descrita a continuación) para intentar controlar la calidad de la geometría.
2. La geometría se transformó a.stl (formato que aproxima la superficie de un modelo sólido a triángulos o estructura de malla) y se realizaron comprobaciones mediante algoritmos de reparación contenidos en paquetes de *software* gratuitos como MeshLab, FreeCAD o MeshMixer. Las

operaciones que se realizaron se basaron fundamentalmente en comprobar la orientación de las caras y cerrar superficies abiertas, entre otras. Una vez reparada la geometría, se realizó una conversión y se introdujo en el *software* CFD, pero nuevamente los resultados fueron poco satisfactorios.

3. Finalmente, se decidió utilizar directamente los archivos.DWG que contienen el modelo en formato nativo y realizar una conversión de la geometría a otros formatos,.iges,.step,.x_b,.x_t, fuera del ecosistema de AutoCAD. Una vez finalizado este proceso, se ejecutó el procedimiento de importación en el *software* de simulación CFD, estrategia que resultó, esta vez, satisfactoria, tanto en el tiempo de importación como en la precisión de la propia geometría y el reconocimiento de cada una de sus caras. Así, se decidió utilizar esta última estrategia como la ideal para abordar este tipo de problemas.

En particular, la dependencia lógica inicial de los convertidores de formato de AutoCAD resultó en un retraso notable y una carga de trabajo adicional muy reseñable al generar problemas en los archivos de salida que no existían en el modelo original y no eran atribuibles al modelado en sí. Se realizaron un total de más de cien pruebas de modelado diferentes en diferentes módulos y se observó que las piezas que dieron lugar a modelos transformados sorprendentemente resultaron no ser válidas. Afortunadamente, el uso de otros convertidores resolvió este problema que delata la falta de confiabilidad de AutoCAD en la conversión de formatos.

Más allá del problema del formato, en el proceso de generación de la geometría se trabajó en todo momento siguiendo un protocolo que permitió realizar comprobaciones en tiempo real, entre las que destacan las siguientes:

1. Superposición de superficies.
2. Presencia de líneas, caras y elementos no volumétricos.
3. Cierre del sólido.
4. Continuidad del espacio dentro del sólido.

Finalmente, es importante destacar el proceso de optimización de la geometría. Como ya se mencionó, fue necesario realizar un importante proceso de simplificación en muchos de los elementos internos de la Catedral de Santiago. Para lograr la simplificación considerada como óptima, se realizaron varias modificaciones y se comprobó su rendimiento en el *software* CFD. Una vez comprobado este rendimiento teniendo en cuenta la precisión, convergencia y velocidad del algoritmo, se decidió optar por el modelo actual, que se compone fundamentalmente de prismas y elementos rectos, reservando las formas curvas para las bóvedas y arcos, por definir superficies de borde y diafragmas relevantes para el flujo de aire, evitando así introducir geometrías que complican el cálculo pero no aportan precisión en pequeños detalles como variaciones

no relevantes de la geometría en el fuste, bases y capiteles de columnas, órganos, esculturas, rejas, etc. También se llevó a cabo una regularización de las dimensiones, descartando diferencias de centímetros que no son relevantes pero que complejizan mucho la creación del modelo, como pequeñas variaciones en las dimensiones de los intercolumnios, divergencias apenas perceptibles en los ángulos del edificio real respecto a la perpendicularidad o paralelismo perfectos, etc.

Destacamos, una vez más, que la optimización de la geometría en ningún caso supone pérdida de precisión, no afecta a los resultados y la variación del volumen de aire considerado en el modelo respecto al caso real es despreciable.

2. Modelo numérico

Una vez construida la geometría exterior de la Catedral, se definió un modelo numérico con el objetivo final de modelar la dinámica del aire interior de la Catedral de Santiago, influenciada por las diferentes entradas/salidas de aire. Para realizar este modelado se utilizó el *software* StarCCM+. Se utilizó el entorno computacional StarCCM+ para introducir nuevos elementos y modificaciones en la geometría inicial, construir la malla computacional y resolver las ecuaciones gobernantes del flujo usando el método de volúmenes finitos. Finalmente, el mismo *software* también se utilizó para el posprocesamiento y la representación de los resultados.

Las ecuaciones de Navier-Stokes (conservación de masa y momento) son las gobernantes del flujo y vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right],$$

donde u_i es la velocidad del aire con sus tres componentes, ρ es la densidad del aire, μ es la viscosidad dinámica y t es el tiempo.

Para caracterizar el flujo se utilizó el modelo realizable k-epsilon turbulento porque es adecuado para la simulación numérica de corrientes de aire dentro de estructuras cerradas y volúmenes de aire confinados, como es el caso de la Catedral de Santiago de Compostela.

Para resolver el modelo se optó por un régimen transitorio, que nos permitió discretizar el dominio temporal en subdominios que nos permitieron observar la evolución temporal de las diferentes variables, así como establecer condiciones de contorno variables

(apertura/cierre de puertas, velocidad variable del aire, análisis dinámico de las variables de temperatura y humedad, etc.).

A) Geometría 3D

La geometría 3D utilizada es la que se muestra en la Figura 5. Es una geometría que reproduce fielmente los espacios interiores de la Catedral de Santiago y tiene la particularidad de ser completamente editable, por lo que constituye una base sobre la que se pueden introducir nuevos elementos e incluso hacer rediseños interiores y exteriores según las condiciones de la Catedral vayan cambiando o según el tipo de variables y condiciones ambientales que se quieran tener en cuenta.

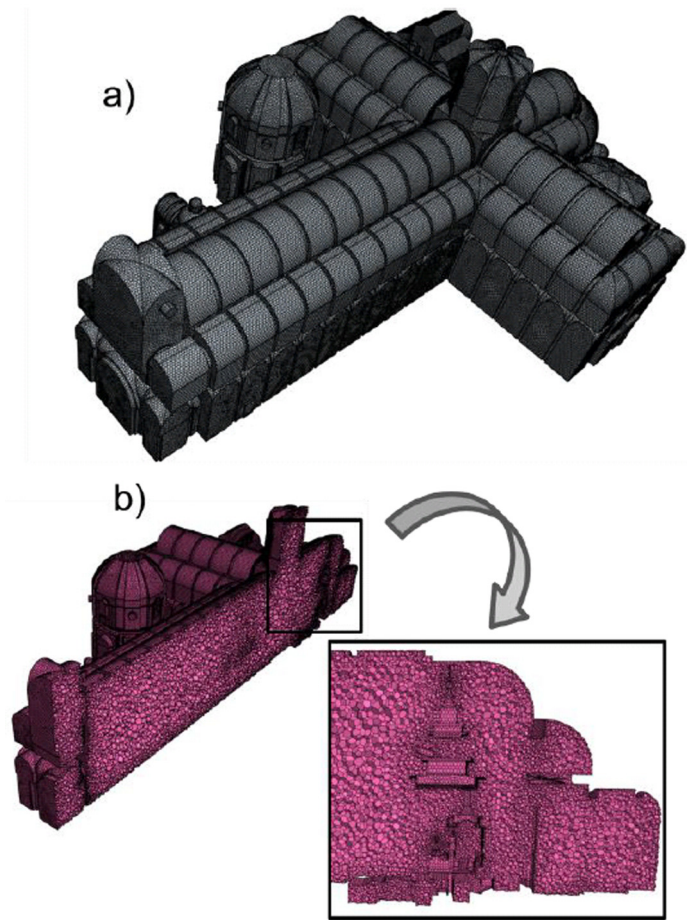
B) Malla

Para poder resolver las ecuaciones de Navier-Stokes en el dominio de computación (volumen interior ocupado por aire) fue necesario dividir el volumen en elementos más pequeños, creando finalmente una malla que nos permitió, además, estudiar las variables de análisis a lo largo de la totalidad del volumen. A la hora de diseñar esta malla fue necesario tener en cuenta los factores de forma de la geometría considerada, el modelo numérico que se iba a utilizar y la tipología, comportamiento y ubicación de las variables que se tenían que analizar. Una vez realizado este análisis, se decidió utilizar una malla formada por elementos poliédricos de tamaño variable construida con ayuda del ecosistema StarCCM+. Cabe señalar que no todos los elementos tienen el mismo tamaño, sino que se utilizan ciertos refinamientos siguiendo los criterios expuestos anteriormente.

En la Figura 7, se pueden observar:

1. Malla poliédrica en la interfaz exterior de la geometría.
2. Corte transversal de la malla siguiendo el eje de la nave central de la Catedral en la que se observan las diferencias de tamaño entre elementos, siendo estos de menor tamaño cerca de las zonas de contacto con los muros de la Catedral y en zonas singulares y de mayor tamaño en partes interiores del volumen. De esta forma, si existen, se pueden captar fenómenos como recirculación de aire o bolsas de aire húmedo cerca de las paredes, entre otros tipos de fenómenos.

Figura 7. a) Malla poliédrica en la interfaz exterior de la geometría. b) Corte transversal de la malla siguiendo el eje de la nave central de la Catedral



Fuente: Elaboración propia

Una vez diseñada la malla, fue necesario realizar un análisis exhaustivo de su rendimiento y del grado de precisión que ofrece. Para ello, se hicieron pruebas de rendimiento del algoritmo con mallas de diferentes dimensiones y se analizaron las diferencias existentes en una misma variable entre cada una de ellas.

En la Tabla 1 se puede ver un análisis de malla con tres mallas diferentes:

Tabla 1. Estudio de independencia de malla utilizando el porcentaje de humedad relativa como variable de análisis

	Número de caras	Porcentaje de humedad relativa (Puerta Inmaculada)	Variación (%)
Malla 1	1 085 580	62.3 %	-
Malla 2	1 568 900	62.4 %	0 %

	Número de caras	Porcentaje de humedad relativa (Puerta Inmaculada)	Variación (%)
Malla 3	2 158 025	62.1 %	0 %

Una vez analizados los resultados con las diferentes mallas, se decidió utilizar la malla que tuviera menor número de elementos, ya que ofrecía una precisión en los resultados muy similar a la de otras más densas con un coste computacional (traducido en tiempo de cálculo) mucho menor. Cabe señalar que, a la hora de seleccionar la malla, además del criterio relacionado con el tiempo de cálculo y la precisión, se tuvo también en cuenta otro criterio directamente relacionado con la robustez y la estabilidad de la simulación. Una simulación que no es estable o robusta puede dejar de funcionar con el proceso ya iniciado o divergir, obligando a tener que modificarla, reiniciarla, e incluso tener que utilizar ciertas condiciones que hacen que el proceso de cómputo se vuelva excesivamente lento. Este criterio es de particular importancia en el presente trabajo cuando se utilizan condiciones de contorno dinámicas de apertura/cierre de puertas y huecos que a menudo causan cambios repentinos en las velocidades de entrada/salida de aire.

Es importante señalar en este punto que los diferentes estudios de malla que llevaron a la elección de una malla optimizada junto con un diseño eficiente de la geometría (entre otros factores) hicieron que los tiempos de cálculo del modelo pasaran de más de 24 horas a unas 3-4 horas aproximadamente. Para la obtención de estos tiempos fue necesario el uso de equipos de supercomputación.

C) Configuración del modelo

Como se mencionó anteriormente, se utilizó un modelo que trabaja en un régimen transitorio (dependiente del tiempo) y turbulento. Además de la parte de la geometría y la malla ya comentada, la correcta definición de las condiciones de contorno tiene especial incidencia en el comportamiento de este modelo. Dentro del propio modelo y con el objetivo de realizar una comparación entre los resultados obtenidos y los registrados en un caso de uso real, se colocaron unos sensores virtuales en el mismo lugar donde están situados los sensores físicos en el momento del análisis de los resultados.

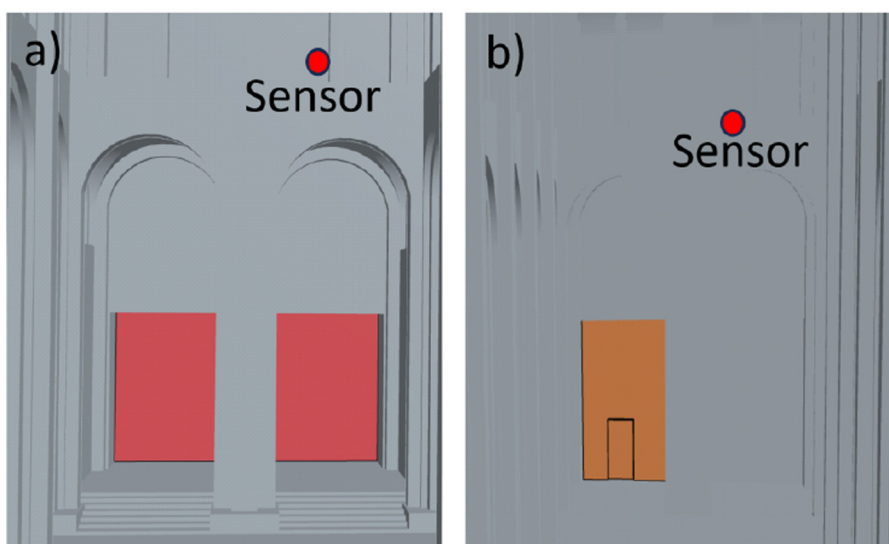
Estas ubicaciones son:

1. Pórtico de la Gloria.
2. Platerías.
3. Plaza de la Inmaculada.

4. Esquina de la nave transepto sur (cerca del órgano).
5. Encima de la puerta del claustro.
6. Girola.

En la Figura 8 se puede ver la ubicación de dos de los sensores virtuales. Cabe destacar que el modelo numérico permite colocar estos sensores en cualquier ubicación de la Catedral, siendo el procedimiento para cambiar su ubicación muy sencillo e intuitivo.

Figura 8. Ubicación de los sensores virtuales. a) En la tribuna sobre las puertas de la Inmaculada. b) En la tribuna situada encima de la Puerta de las Platerías



Fuente: Elaboración propia

D) Condiciones de contorno

El término condiciones de contorno se refiere a aquellas condiciones físicas (muro, entrada, salida...) que se imponen en los contornos de la geometría y que permiten, en el caso del presente proyecto, definir la influencia que tienen las condiciones atmosféricas del exterior en la dinámica del aire en el interior de la Catedral.

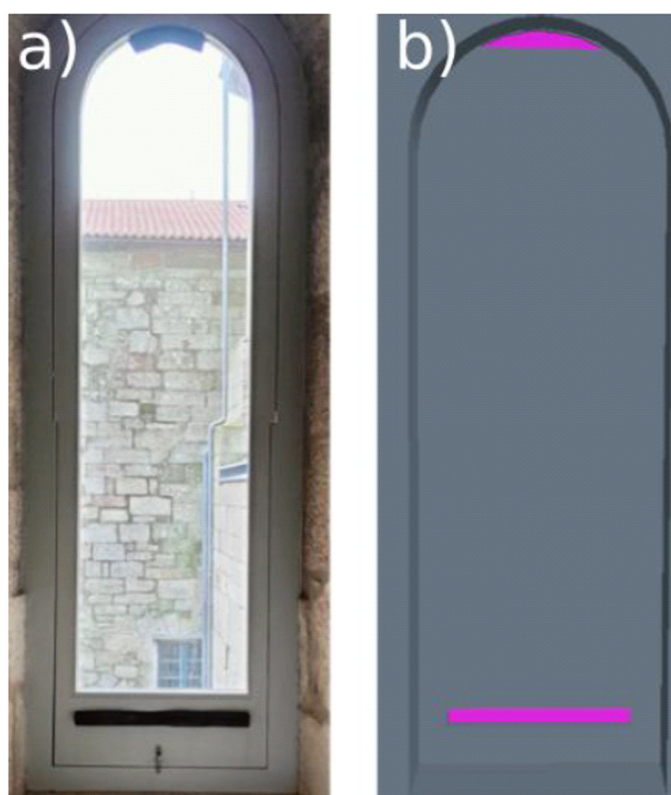
En el marco de este trabajo, se definieron tres tipologías principales de condiciones de contorno:

1. Los muros que confinan el aire en el interior del complejo catedralicio.
2. Las puertas, que son las superficies a través de las cuales se produce el mayor intercambio de aire entre la Catedral y el exterior.

3. Los pequeños huecos o ranuras cuyo comportamiento se encuentra condicionado por las condiciones atmosféricas exteriores pero que también se ve afectado por la dinámica interior generada por las grandes masas de aire.

Al implementar las condiciones de contorno, existen dos formas de proceder: o se modela el elemento de intercambio (puerta/hueco) sobre el modelo en 3D o se definen elementos computacionales que se traducen en superficies virtuales que permiten un intercambio de variables físicas sin necesidad de una modelización del elemento constructivo en cuestión. En el presente trabajo se optó por utilizar una combinación de ambas metodologías con el objetivo de conseguir una alta precisión sin penalizar excesivamente el rendimiento del algoritmo. En la Figura 9 se puede observar la representación de los huecos que forman parte de algunas de las ventanas ubicadas en la tribuna de la Catedral.

Figura 9. Representación de los vanos ubicados en algunas de las ventanas de la tribuna. a) Representación de los huecos mediante *software* de diseño asistido por ordenador (CAD). b) Ventana ubicada en la tribuna de la Catedral con dos huecos tapados con material aislante para impedir el paso del aire



Fuente: Elaboración propia

Una vez definidas las diferentes condiciones de contorno, fue necesario definir la forma en que cada una de ellas interactúa con el exterior. De esta forma se definieron condiciones de velocidad de entrada/salida, presión de entrada/salida (succión) o presión atmosférica (salida libre). Además de estas condiciones, era importante conocer exactamente los criterios de apertura y cierre de la Catedral que marcarán decisivamente el comportamiento interior de la dinámica del aire. En este sentido, con el apoyo del equipo técnico de la Catedral, se obtuvieron los tiempos de apertura/cierre de cada una de las grandes puertas de la Catedral en el momento de realizar este estudio y que se encuentran recogidos en la siguiente tabla 2:

Tabla 2. Horarios de apertura y cierre de cada una de las puertas de la Catedral de Santiago

Puerta	Horario de apertura [07:00-21:00]
Puerta de paso de las Platerías	[07:00-13:00] - [13:15-19:30] - [19:45-21:00]
Gran Puerta (dos hojas)	[13:00-13:15] - [19:30-19:45]
Portones de la Inmaculada	[08:00-09:30] - [10:00-12:00] - [13:00-19:00] - [19:45-21:00]
Puerta que va de la nave al claustro	[10:00-12:00] - [12:45-19:00]
Puerta que va de la nave principal a la torre norte	[10:00-21:00]

Una vez registrado el comportamiento de cada una de las puertas de la Catedral y definido el tipo de condición de contorno que aplicar, resulta necesario asignar una magnitud física a la mencionada condición. Para determinar el valor de esta magnitud física, se optó por utilizar la información de la estación meteorológica más cercana a la Catedral, la estación Santiago-EOAS situada en el campus sur, cerca del edificio de la Facultad de Física de Santiago de Compostela. De ella es posible extraer una gran cantidad de información, incluidas la humedad relativa, la temperatura y la velocidad del viento. En la Tabla 3 se muestra un ejemplo de tabla de la información extraída de la estación para un día determinado.

Tabla 3. Ejemplo de tabla de datos que se pueden extraer del sitio web <https://www.meteogalicia.gal> y que corresponden a la estación meteorológica Santiago-EOAS

Instante lectura	Chuvia	Dirección do vento a 10m	Humidade relativa media a 1.5m	Temperatura media a 1.5m	Velocidade do vento a 10m
2023-08-12 00:10:00.0.0		267.0	97.0	20.12	6.2
2023-08-12 00:20:00.0.0		271.0	97.0	20.12	7.6
2023-08-12 00:30:00.0.0		348.0	97.0	19.83	10.5
2023-08-12 00:40:00.0.0		18.0	96.0	19.14	10.8
2023-08-12 00:50:00.0.0		21.0	94.0	18.82	9.0
2023-08-12 01:00:00.0.0		16.0	93.0	18.67	8.2
2023-08-12 01:10:00.0.0		13.0	93.0	18.63	3.4
2023-08-12 01:20:00.0.0		34.0	93.0	18.59	4.4
2023-08-12 01:30:00.0.0		24.0	92.0	18.53	9.0
2023-08-12 01:40:00.0.0		35.0	92.0	18.46	7.9
2023-08-12 01:50:00.0.0		17.0	91.0	18.26	9.1
2023-08-12 02:00:00.0.0		12.0	90.0	18.04	10.1
2023-08-12 02:10:00.0.0		351.0	90.0	17.85	8.5
2023-08-12 02:20:00.0.0		20.0	90.0	17.7	7.7
2023-08-12 02:30:00.0.0		37.0	90.0	17.64	5.3

Si bien la información obtenida de variables como la humedad y la temperatura es trasladable al estado circundante de la propia Catedral, otras variables, como la velocidad del viento, necesitan ser modificadas y adaptadas teniendo en cuenta los diversos obstáculos que modifican este tipo de variables en el trayecto que va desde la estación meteorológica hasta la superficie exterior de la Catedral.

III. RESULTADO DE LA MODELIZACIÓN MATEMÁTICA

Una vez construida la geometría 3D y la malla, definidas las condiciones de contorno y ejecutado el algoritmo de resolución, se procedió al análisis de los resultados obtenidos y al posprocesado del material gráfico que se elaboró a partir de los datos obtenidos tras la finalización de la simulación numérica.

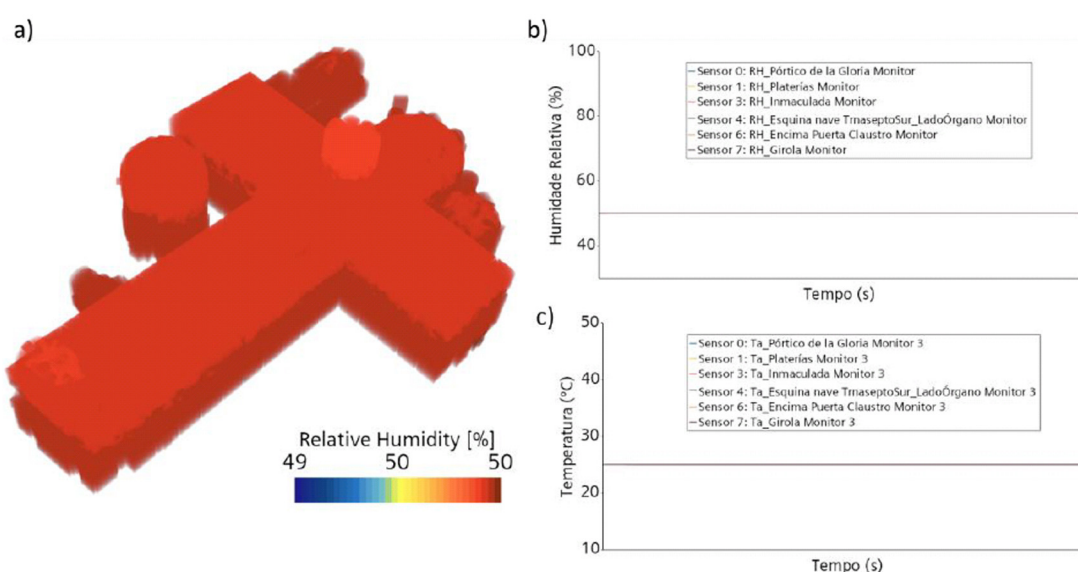
Las primeras simulaciones llevadas a cabo en el marco de este trabajo tenían un doble objetivo: por un lado, analizar una posible situación de apertura/cierre de determinadas puertas de la Catedral y, por otro, evaluar la estabilidad y el correcto funcionamiento del algoritmo. Las características y detalles de estas simulaciones se describen a continuación.

1. Simulación 1

En este caso, se considera la entrada de aire por las puertas situadas en la plaza de la Inmaculada y la salida por la Puerta de las Platerías, quedando el resto de grandes puertas y huecos cerrados. La humedad relativa en el interior se fija en el 50 % y se opta por fijar la humedad relativa en el exterior (que entra a la Catedral siguiendo el flujo de aire) también en el 50 %. La temperatura interior y exterior también se fija en 25 °C.

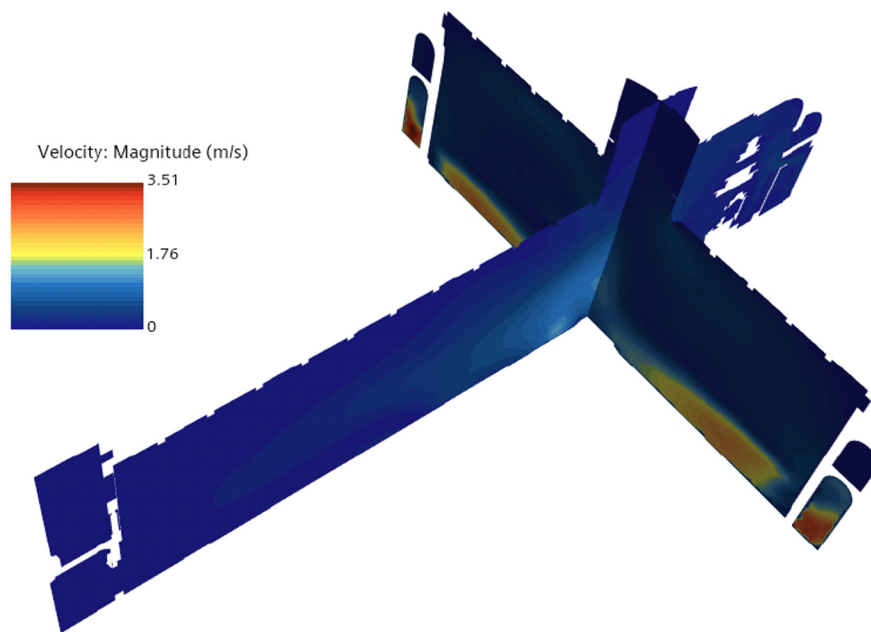
La distribución de humedad y temperatura en el interior de la Catedral es la prevista previamente, obteniendo valores de 50 % de humedad y 25 °C de temperatura en el interior (véase Figura 10).

Figura 10. Resultado de la Simulación 1. a) Representación 3D de la distribución de la humedad relativa en el volumen de aire interior. b) Evolución de la humedad en diferentes localizaciones. c) Evolución de la temperatura en diferentes localizaciones



Además de comprobar que el algoritmo de resolución se comporta de forma robusta y que ofrece resultados coherentes, es posible analizar otro tipo de fenómenos, como la presencia de la corriente principal que discurre entre las puertas de la Inmaculada y de las Platerías, creando un espacio de semiestancamiento en la nave principal que se extiende desde el Pórtico de la Gloria hasta el altar (Figura 11). Se puede ver en azul oscuro una zona de muy baja velocidad en la nave que se extiende desde el Pórtico de la Gloria hasta el altar.

Figura 11. Representación de la velocidad del aire en secciones longitudinales de las naves principales

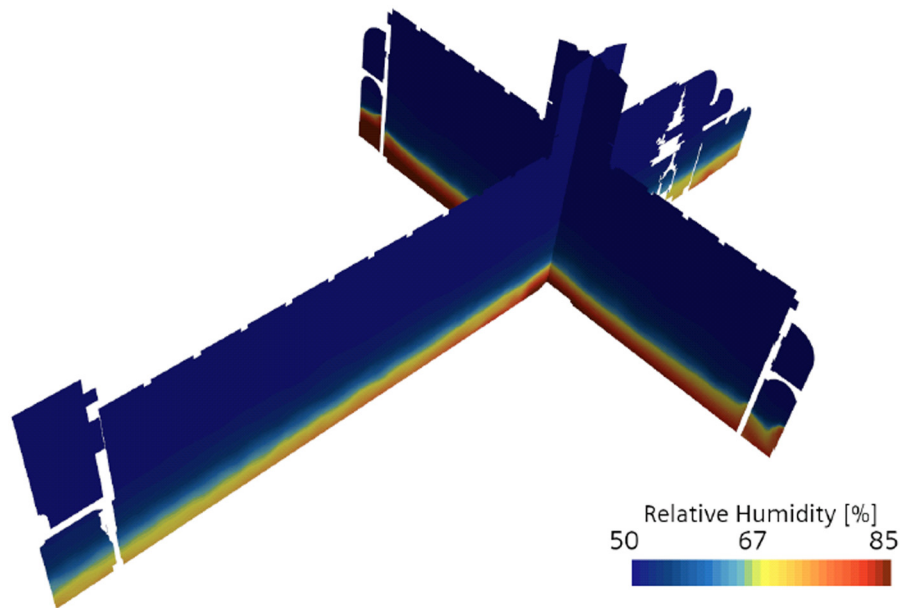


2. Simulación 2

Se utiliza una condición de apertura/cierre de puerta similar a la utilizada en la simulación 1, pero cambiando los valores de humedad y temperatura. Los nuevos valores son los siguientes:

- humedad relativa interior: 50 %;
- humedad relativa exterior: 85 %;
- temperatura interior: 25 °C, y
- temperatura exterior: 18 °C.

Figura 12. Representación de la humedad del aire en secciones longitudinales de las naves principales



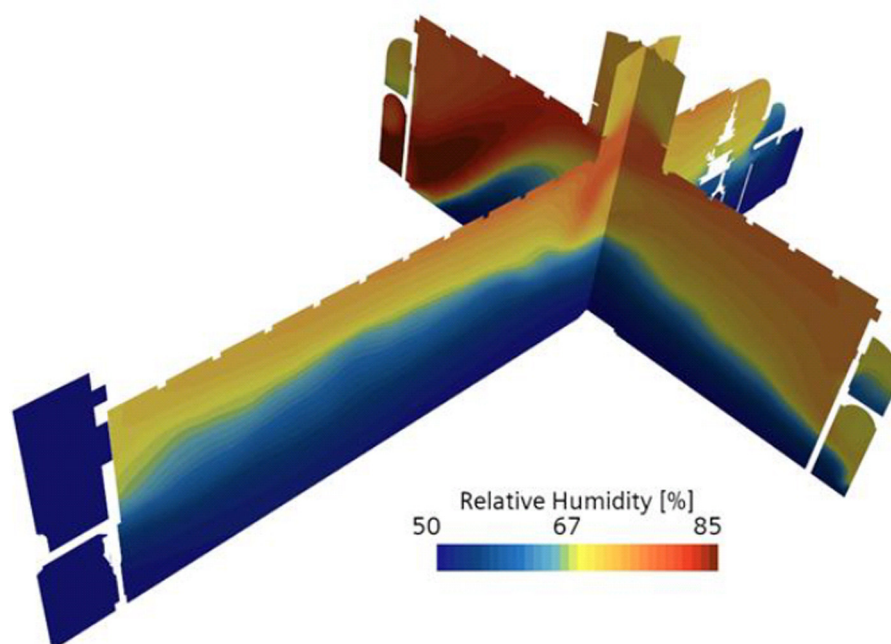
En la Figura 12 se puede comprobar el comportamiento que tiene del aire húmedo que entra desde el exterior a una temperatura inferior a la existente en el interior del edificio. Así, el aire húmedo entra por las puertas de la Inmaculada y se distribuye a poca altura, quedándose muy cerca del suelo.

3. Simulación 3

En esta configuración establecemos las mismas entradas y salidas que en los otros dos casos, pero con las siguientes magnitudes:

- humedad relativa interior: 50 %;
- humedad relativa exterior: 85 %;
- temperatura interior: 25 °C, y
- temperatura exterior: 25 °C.

Figura 13. Representación de la humedad del aire en secciones longitudinales de las naves principales



Se puede observar en la Figura 13 cómo, en este caso, la corriente de aire cargada de humedad que entra desde el exterior asciende rápidamente, situándose al cabo de pocos minutos en las capas superiores de la Catedral, ocupando parte del volumen del cimborrio e incluso llegando a la zona del Pórtico de la Gloria.

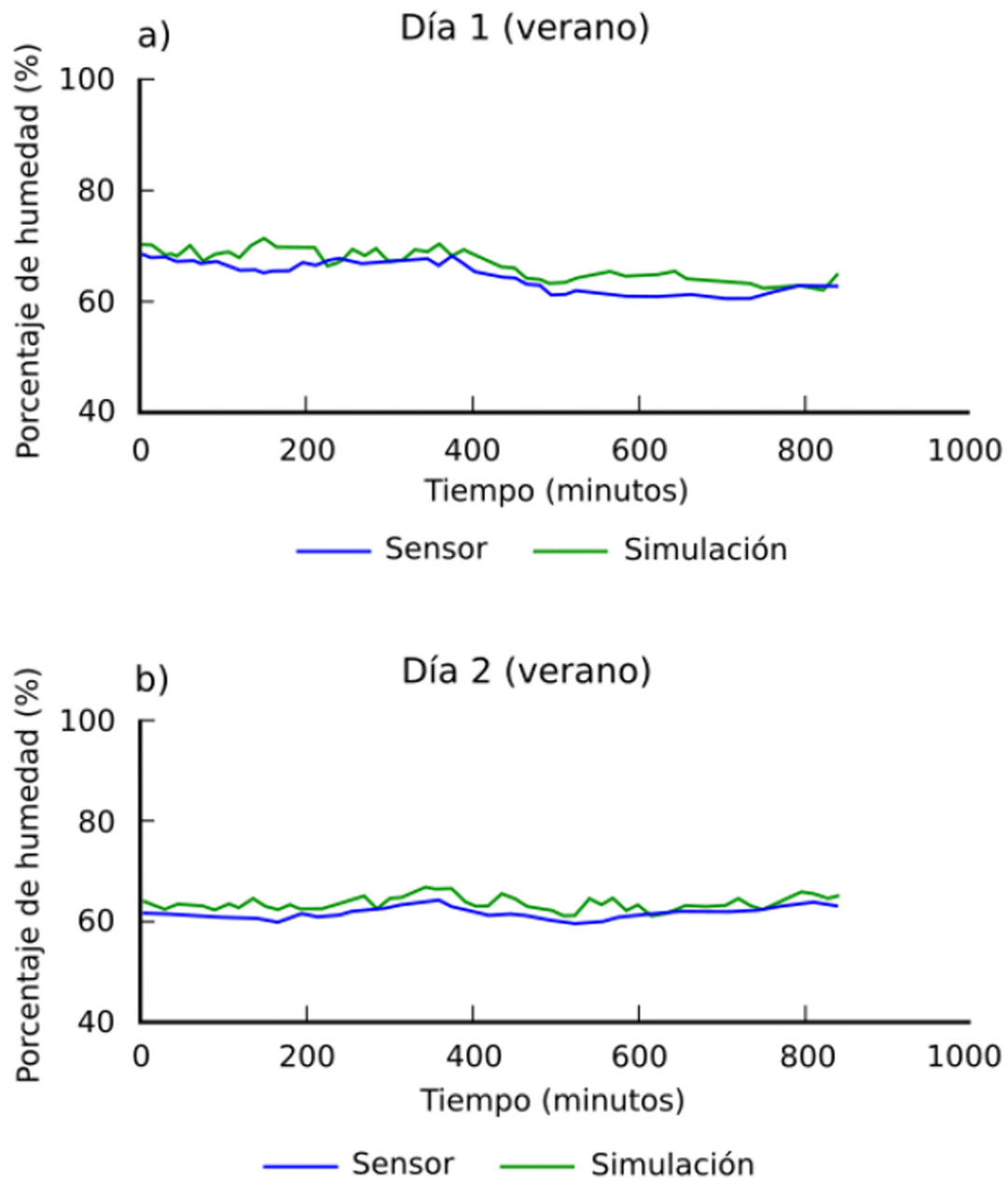
4. Comparación de los resultados obtenidos en los sensores virtuales del modelo numérico con aquellos registrados por los sensores físicos localizados en la Catedral

Una vez conocida la ubicación de los diferentes sensores en el interior de la Catedral y comprobado el buen funcionamiento del algoritmo, resulta de gran ayuda para la calibración del modelo la comparación de los resultados entre estos sensores y los virtuales colocados en las mismas localizaciones del modelo digital.

Para realizar esta calibración se utilizaron datos reales de los sensores en dos días de verano y uno en invierno. De esta manera se pudo observar el comportamiento del modelo cuando el clima es estable y no húmedo (agosto) y, en una situación muy diferente, cuando el clima es húmedo en el mes de noviembre.

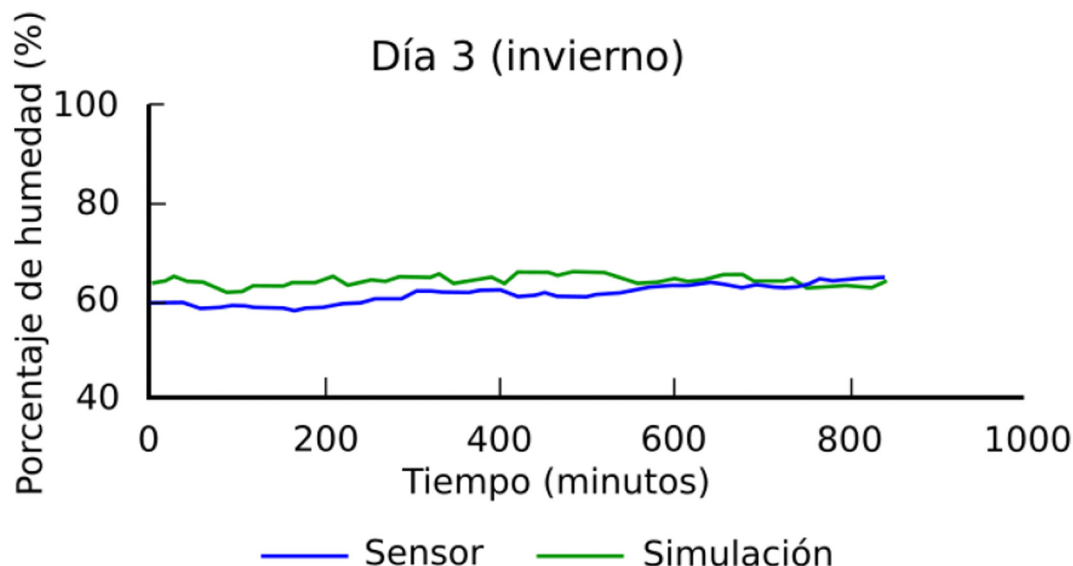
La Figura 14 muestra la comparación entre los valores obtenidos por el sensor real y el virtual en el emplazamiento contiguo al órgano en un período de tiempo de 840 minutos (horario normal de apertura de la Catedral) los días 12 y 13 de agosto (verano).

Figura 14. Comparativa del comportamiento de la humedad relativa en el sensor ubicado en la tribuna al lado del órgano, teniendo en cuenta el sensor físico y el sensor virtual (simulación). a) Día 12 de agosto. b) Día 13 de agosto



Para tener una comparación más robusta del comportamiento de los sensores, se realizó también un estudio teniendo en cuenta datos del 3 de noviembre, cuyos resultados se muestran en la siguiente gráfica (Figura 15):

Figura 15. Comparativa del comportamiento de la humedad relativa en el sensor ubicado en la tribuna al lado del órgano, teniendo en cuenta el sensor físico H3 y el sensor virtual (simulación)



Como se puede observar, existe una buena correlación entre los valores obtenidos en el modelo numérico y los registrados por los sensores reales, de manera que se puede concluir que el modelo se comporta con precisión durante todo el período de apertura.

IV. CONCLUSIONES

En el presente artículo se describen el diseño y el desarrollo de un modelo matemático capaz de describir la dinámica de los flujos de aire en el interior de la Catedral de Santiago. Para este cometido, fue necesario dividir la ejecución del proyecto en dos grandes fases: en la primera fase, se construyó una geometría tridimensional de la Catedral de Santiago, la cual se basó en una geometría existente a la que hubo que aplicar ciertas simplificaciones y modificaciones para que pudiera ser utilizada como dominio computacional por un *software* CFD. Una vez obtenida esta geometría, se procedió a la definición de un modelo numérico fundamentado en la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes mediante el método de volúmenes finitos. Ambas partes del trabajo (geometría y modelo numérico) fueron objeto de profundas optimizaciones para lograr los resultados deseados en un menor espacio de tiempo y con una alta precisión. Este aspecto es especialmente relevante, ya que permitirá utilizar el modelo como una herramienta de predicción que permita una toma ágil de decisiones con el

objetivo de anticipar situaciones meteorológicas adversas que provoquen determinadas condiciones ambientales agresivas con los elementos patrimoniales en el interior de la Catedral. Es importante resaltar que el modelo matemático construido es un modelo "vivo" que puede actualizarse en cualquier momento, ya sea añadiendo nuevas estructuras (en el caso de que se modifiquen elementos interiores) o cambiando las condiciones de contorno a voluntad.

Aunque el uso de técnicas basadas en dinámica de fluidos computacional es relativamente común en muchos campos (aeronáutica, biología, ingeniería...), su uso destinado a la conservación del patrimonio es altamente novedoso. También hay que resaltar la enorme dificultad que supone implementar este tipo de metodologías en un edificio tan complejo como la Catedral de Santiago, tanto desde el punto de vista del volumen de aire que alberga en su interior como desde el punto de vista de la complejidad morfológica creada por las diferentes subestructuras que la componen.

En definitiva, el modelo matemático construido pretende ser una herramienta de ayuda en la toma de decisiones del personal técnico de la Catedral responsable de la conservación del patrimonio interior para que pueda anticiparse a situaciones adversas y evitar tener que evaluar determinadas estrategias en un ambiente real que pueden suponer un grave riesgo para algunos elementos patrimoniales singulares como el Pórtico de la Gloria.

Bibliografía

1. BARNECHE NAYA, Viviana et al. Aplicación para la inspección espacial, volumétrica y seccional interactiva de la Catedral de Santiago de Compostela. En: *Virtual Archaeology Review*. 2012, vol. 3, n.º 6, pp. 78-82. ISSN 1989-9947. Disponible en: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4448>.
2. HERNÁNDEZ IBÁÑEZ, Luis Antonio y BARNECHE NAYA, Viviana. An interactive installation for the architectural analysis of space and form in historical buildings. En: *Learning and Collaboration Technologies. Designing and Developing Novel Learning Experiences: First International Conference, LCT 2014, Held as Part of HCI International 2014, Heraklion, Crete, Greece, June 22-27, 2014, Proceedings, Part I*. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 43-52. ISBN 978-3-319-07481-8. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07482-5_5.
3. MCALLISTER, Daniel, WARKE, Patricia y MCCABE, Stephen. Stone temperature and moisture variability under temperate environmental conditions: Implications for sandstone weathering. En: *Geomorphology*. 2017, vol. 280, pp. 137-152. ISSN 0169-555X. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.010>.

4. MUÑUZURI, Alberto P., OTERO-CACHO, Alberto y MIRA, Jorge. Ventilation time recommendation system incorporating local meteorological data. En: *Indoor and Built Environment*. 2022, vol. 31, n.º 5, pp. 1418-1437. ISSN 1420-326X. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/1420326X221081738>.
5. OGUCHI, Chiaki T. y YU, Swe. A review of theoretical salt weathering studies for stone heritage. En: *Progress in Earth and Planetary Science*. 2021, vol. 8, n.º 1, p. 32. ISSN 2197-4284. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00414-x>.
6. Parlamento Europeo. Comisión de Cultura y Educación. *Hacia un enfoque integrado del patrimonio cultural europeo*. Disponible en: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2015-0207_ES.html. 2014/2149(INI)).
7. STANASZEK-TOMAL, Elżbieta. Environmental factors causing the development of microorganisms on the surfaces of national cultural monuments made of mineral building materials. En: *Coatings*. 2020, vol. 10, n.º 12, p. 1203. ISSN 2079-6412. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/coatings10121203>.
8. WANG, Juan, CAO, Xiaoqing y LIU, Haojin. A review of the long-term effects of humidity on the mechanical properties of wood and wood-based products. En: *European Journal of Wood and Wood Products*. 2021, vol. 79, pp. 245-259. ISSN 0018-3768. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01665-7>.
9. ZHANG, Zhizhen et al. Deterioration of physical and mechanical properties of rocks by cyclic drying and wetting. En: *Geofluids*. 2021, vol. 2021, pp. 1-15. ISSN 1468-8123. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2021/6661107>.

Notas

- (1) Comunicación presentada en el curso "La protección del patrimonio histórico y su conexión con el urbanismo", celebrado en Santiago de Compostela los días 10, 11 y 12 de abril de 2024.

Información sobre el artículo

Título del artículo: "Modelo computacional para el análisis y predicción de la circulación de aire en el interior de la Catedral de Santiago de Compostela"

Autor: Jorge Mira Pérez, Alberto Pérez Muñuzuri, Alberto Otero Cacho

Incluido en el número monográfico sobre *Plan Estatal de Formación Continua 2024. Miscelánea* de Cuadernos Digitales de Formación 1 - 2024

DOI: <https://doi.org/10.62659/CF2400114>

Editor: Consejo General del Poder Judicial (Madrid)

Fecha de publicación: 2024

Copyright 2024, Consejo General del Poder Judicial

Licencia:



Notas

9 referencias bibliográficas