

# Aplicación para la inspección espacial, volumétrica y seccional interactiva de la Catedral de Santiago de Compostela.

Viviana Barneche Naya, Luis A. Hernández Ibáñez, Alberto Jaspe Villanueva y Gustavo Fariña Fernández

VideaLAB. Grupo de Visualización Avanzada. Universidade da Coruña. España

---

## Resumen

*El presente artículo describe el proceso de diseño, producción e implementación de una aplicación destinada a permitir el análisis formal interactivo de la Catedral de Santiago de Compostela. La complejidad geométrica del modelo edificio para el detalle requerido, derivada principalmente de la profusión de elementos estilísticos presentes en el mismo y que constituye al fin y al cabo una de sus señas características, impuso utilizar soluciones basadas en cálculo de radiosidad por refinamiento progresivo para la generación de un modelo que pudiese ser manipulable en tiempo real, con calidad visual de iluminación global, a la vez que seccionable interactivamente mediante interacción multitáctil.*

**Palabras Clave:** CATEDRAL DE SANTIAGO, RADIOSIDAD, TIEMPO REAL, INTERACCIÓN MULTITÁCTIL

---

## Abstract

*This paper describes the design, production and implementation of an application for the formal analysis of the Cathedral of Santiago de Compostela. The geometrical complexity of the model of this building for the level of detail required, derived from the profusion of stylistic elements present, that constitutes one of its signs of identity led to use the progressive refinement radiosity method to generate a model which could be handled in real-time, adding the visual quality of global illumination, to be implemented in an application that allows the user to interactively inspect and cross-section the model.*

**Key words:** CATHEDRAL OF SANTIAGO, RADIOSITY, REAL-TIME, MULTITACTILE INTERACTION

---

## 1. Introducción

El análisis de la forma arquitectónica es un proceso que va más allá de la simple contemplación del edificio y que involucra una indagación en los aspectos semánticos que componen el objeto construido. Masa, espacio y función se entrelazan, materializando elementos constructivos cuya relación ha de entenderse si se quiere comprender aquel.

En cada tiempo, la arquitectura ha buscado respuestas formales para satisfacer los requerimientos funcionales del edificio, ciñéndose a las imposiciones constructivas y estructurales de las técnicas de su época a través de la invención y el diseño. La forma del edificio y sus componentes surgen por tanto de una macla de técnica y estética vinculadas a un momento histórico y cultural concreto que define lo que se conoce como *estilo*.

El caso que se describirá en estas líneas, la Catedral de Santiago de Compostela, constituye un buen ejemplo en el que concurren rasgos estilísticos de diferentes épocas conviviendo juntos. Su traza inicial románica, que tantas veces se ha utilizado como paradigma ilustrador de las características de este estilo, es modificada a lo largo de los siglos mediante múltiples aditamentos y reformas que han transformado partes y añadido elementos, en ocasiones de manera sutil y en otras de forma espectacular, destacando entre estas últimas la fenomenal Fachada del Obradoiro, ejecutada por el arquitecto Casas y Novoa a mediados del siglo XVIII.

La generación de un modelo digital de un edificio, de cara a la exploración interactiva del mismo que permita llevar a cabo ese análisis formal, requiere por tanto de la recreación de cada uno de sus elementos constituyentes con un nivel de detalle adecuado para la correcta descripción visual de los mismos.

Como es bien sabido, la creación de un modelo para su exploración interactiva en tiempo real impone unas duras condiciones de contorno en la confección del mismo de cara a obtener una geometría altamente eficiente en términos de información visual frente a tiempo de cálculo. En ese sentido, la presencia de una geometría profusa de elementos a representar constituye uno de los mayores obstáculos al rendimiento computacional, máxime cuando se busca incorporar características visuales de la volumetría que se consideran importantes, tales como las sombras arrojadas o la iluminación difusa.

A continuación se explicará los criterios y metodología empleados en la realización del caso que nos ocupa.

## 2. Objetivos

El trabajo que aquí se describe responde a la necesidad de contar con una maqueta virtual interactiva de características tales que:

- Pudiese ser manipulada a través de su rotación, aproximación a cualquier elemento de la misma y sección interactiva por cualquier plano horizontal, transversal o sagital.
- Respondiese lo más fielmente posible a la geometría del edificio original en sus aspectos arquitectónicos, a fin precisamente de preservar la fidelidad formal, evitando en lo posible realizar simplificaciones en todos aquellos elementos constructivos de carácter no escultórico, así como la emulación o sustitución de geometría por textura fotográfica.
- Contase con un mínimo de calidad visual que garantizase al menos la presencia de sombras arrojadas en todo el modelo, así como reflexión difusa de la luz.
- Pudiese manipularse utilizando criterios de interacción natural.
- Mostrase únicamente los aspectos formales arquitectónicos, descartando la obra escultórica pétreo o lígnea, mobiliario, etc., limitándose al templo y excluyendo el museo, claustro, cripta, e iglesia aledaña de la Corticela.

### 3. Metodología

#### 3.1 Diseño del proyecto

El cumplimiento de los objetivos impuso unas fuertes restricciones de cara a obtener un modelo altamente eficiente para que a pesar de su complejidad geométrica y los requisitos de iluminación pudiera ser manipulado interactivamente por un ordenador dotado de una tarjeta gráfica de consumo.

El criterio de la iluminación global era necesario para visualizar de manera adecuada tanto los matices volumétricos de las zonas en sombra, como, y muy especialmente, el interior iluminado mediante luz indirecta y reflexión difusa. Hoy por hoy, aunque hay trabajos (MARTIN, 2010) en la dirección de calcular estos efectos en tiempo real, por las características del caso que nos ocupa fue necesario utilizar una aproximación basada en el precálculo de la iluminación. Comúnmente, esto se implementa en las tecnologías actuales de tiempo real mediante la asignación a cada superficie del modelo de un mapa de iluminación, o *lightmap*, sin embargo, la previsible complejidad del modelo, hacía inaceptable una solución de ese tipo por el alto número de ficheros de textura necesarios y la memoria requerida para alojarlos con una resolución aceptable.

No obstante, precisamente la alta densidad de poligonalización del modelo es conceptualmente afín con otro de los algoritmos de cálculo de iluminación global: la radiosidad por refinamiento progresivo, que si bien es poco usado hoy en día en los programas de visualización estándar, permite la obtención y almacenamiento de los datos de iluminación del modelo en los vértices de la malla asociada al mismo, denominada *malla energética*. La obtención y uso de mallas energéticas distintas para el exterior y el interior del templo permitiría además conjugar dos estados de iluminación con rangos dinámicos muy dispares correspondientes a la iluminación solar en el exterior y artificial en el interior. El número máximo de polígonos que constituiría la malla energética quedaría por tanto acotado por la potencia gráfica del equipo que la visualizase.

Para permitir la inspección de la estructura espacial del templo y la relación interior-exterior del mismo, se planteó una aplicación

con un sistema de secciones interactivas a lo largo de tres ejes, obteniéndose cualquier corte sagital, transversal u horizontal, coordinado con un modelo de interacción multitáctil basado en las acciones de zoom, encuadre y rotación presentes hoy en día en los dispositivos de este tipo para su control mediante la acción de dos dedos sobre la pantalla.

#### 3.2 Documentación

La información necesaria para confeccionar el modelo se obtuvo de las publicaciones con información planimétrica del templo existentes (CONANT, 1983) (FRANCO, 1999) (TAÍN, 1999) complementada por la documentación fotográfica en resolución Gigapixel de la aplicación "Catedral Libro de Piedra" (ILUX, 2010) que se realizó previamente y como parte complementaria de este trabajo. Estas imágenes pueden ser asimismo consultadas mediante la activación de iconos en el propio modelo en la aplicación final.

#### 3.3 Modelado

El modelo fue confeccionado en AutoCAD, aplicando criterios de sintaxis formal arquitectónica en la creación de todos sus elementos y atendiendo a sus reglas estilísticas de trazado. Esto es, considerando por ejemplo, una columna como la suma de plinto, basa, fuste y capitel, y no como la simple réplica de un sólido de medidas dadas. Ello permitió la generación de múltiples elementos reutilizables, y dotó al modelo de una regularidad, modulación y apariencia canónica, que aunque le resta un matiz de fidelidad frente a las irregularidades constructivas del templo real, realza características que ayudan al análisis formal del mismo.

La imposición del tiempo real requirió utilizar únicamente técnicas de modelado poligonal con todas las caras correctamente orientadas. El modelo final comprendió 797.695 polígonos en el exterior y 261.879 en el interior



Figura 1. Modelo exterior

#### 3.4 Cálculo de la iluminación.

El cálculo de la iluminación se llevó a cabo utilizando el programa Lightscape, que permite la generación de una malla energética de radiosidad asociada con valores de iluminación en cada vértice de la misma, empleando para ello la técnica del refinamiento progresivo, esto es, la subdivisión de cada

superficie en otras más pequeñas en función del gradiente de iluminación a lo largo de la misma. Es aquí donde la complejidad del modelo jugó muy a favor del cálculo, ya que la mirada de elementos de pequeño tamaño que lo componen permitió que en muchos casos la subdivisión fuese escasa o nula. Se estableció un límite a las dimensiones de los elementos de la malla energética de 0,40 m en el exterior y 0,32 m en el interior, con excepciones en zonas de sombras muy perfiladas que requiriesen una subdivisión específica.



Figura 2. Detalle de la figura 1

La malla energética de radiosidad final quedó compuesta por 3,8 millones de polígonos en el exterior y de 2,1 millones de polígonos en el interior, resultando un ratio de subdivisión respecto a la malla poligonal original de 4,7 y 8,0, es decir, muy por debajo de los ratios comunes en la aplicación de esta técnica, con similares resultados visuales.

La iluminación por este método refleja de manera adecuada la reflexión difusa de la luz, tanto en el interior como en las zonas de sombra exteriores y almacena adecuadamente el contorno de las sombras arrojadas.

Las mallas de radiosidad exterior e interior fueron importadas en el programa 3DS Max para su exportación al formato OSG utilizando el *plug-in* disponible para el mismo, tras la aplicación a la geometría de los modificadores LSColor, LSMesh y VertexColor.

### 3.5 La aplicación interactiva

#### 3.5.1 Motor

El modelo catedralicio se muestra interactivamente en una aplicación desarrollada al efecto, utilizando para el renderizado en tiempo real el motor gráfico *OpenSceneGraph* (MARTZ, 2007) basado en el estándar *OpenGL*. Como *scenegraph*, las distintas partes del modelo digital son organizadas en nodos y conectadas mediante un grafo. Cada uno de estos nodos contiene, además de los datos puramente geométricos, información de estado que

indica a la tarjeta gráfica cómo debe visualizarse, como los modos de organización geométrica, *shading*, etc.

Para lograr mover con fluidez los 5,9 millones de polígonos que representan la catedral, se utilizan *Vertex Buffer Objects* (VBO) que permiten almacenar la información de los vértices, las normales, etc. en *buffers* especiales en la memoria gráfica, evitando uno de los mayores cuellos de botella en este tipo de aplicaciones, la transferencia entre memorias.

#### 3.5.2 Preiluminado por vértice

Como se ha indicado anteriormente, para iluminar la catedral con el modelo realista precalculado usando la técnica de radiosidad la información de radiancia es almacenada por cada vértice, con un valor normalizado en función de los máximos y mínimos de la escena. En la etapa de render, la iluminación estándar se desactiva y el color final de cada vértice, procedente del cálculo descrito en 3.4, es modulado por este valor de luminancia. Además, utilizando un sombreado de tipo *smooth shading*, se genera una transición lineal de la iluminación a lo largo de la superficie de cada polígono, de forma que no existen cambios bruscos de iluminación que podrían inducir artefactos visuales.

#### 3.5.3 Planos de sección

Para conseguir el efecto de sección del modelo, se han utilizado unas entidades especiales definidas en el estándar de *OpenGL* llamados *Clip Planes*, o planos de corte. Éstos permiten dividir el espacio entero de la escena usando planos, y desechar toda la geometría que se encuentre en una de las dos mitades, aquella apuntada por la normal del plano.

Utilizando la representación en grafos de la escena, se definió un *subscenegraph* especial de elementos cortables para gestionar de forma eficiente las partes del modelo digital que se puedan seccionar en la aplicación. En él se define un grupo por separado del que cuelgan todos aquellas partes seccionables del modelo, otro grupo con la geometría autogenerada de los ejes, que servirá de interfaz para que el usuario pueda mover los planos de corte, y un tercer nodo de estado con los parámetros de corte.

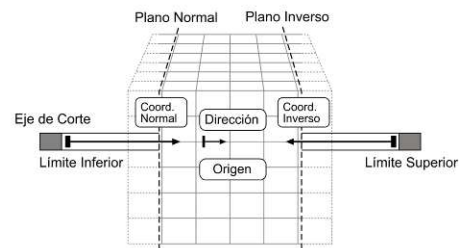


Figura 2. Esquema del sistema de seccionado.

Cada eje de sección podrá entonces tener dos planos, uno en cada sentido, definidos por la ecuación del plano y sus normales, así como unos límites de sección calculados en función de la *bounding box* de los modelos seccionables.

A fin de que el área seccionada aparezca en un color descriptivo, se implementó un *shader* encargado de colorear las caras posteriores de cada polígono, rellenando de esta manera en todo

momento de este color el espacio entre el modelo interior y el exterior.

### 3.5.4 Movimiento

La visualización arquitectónica requiere un interfaz en el que el usuario, tanto generalista como especializado, pueda examinar sin trabas cualquier vista del modelo, ya sea un detalle como una perspectiva general.

Para lograr este objetivo, se utilizó la tecnología de los monitores multitáctiles, que permiten dos o más toques al mismo tiempo, en combinación con un paradigma de movimiento propio que explicamos a continuación, basado en los gestos a los que los teléfonos móviles y otros dispositivos nos están acostumbrando, como alejar los toques de los dedos para hacer zoom o usar un solo toque para desplazar la vista.

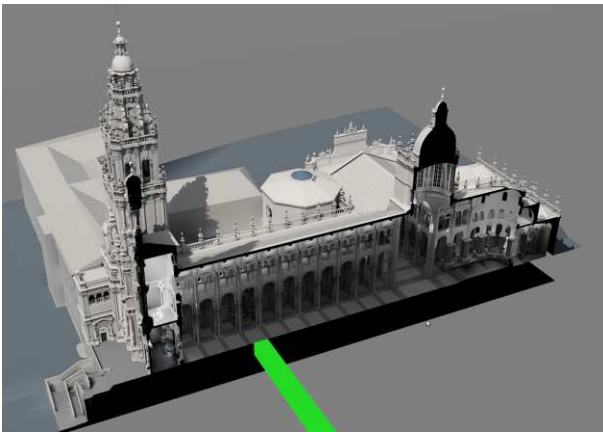


Figura 3. Seccionado sagital y eje interactivo.

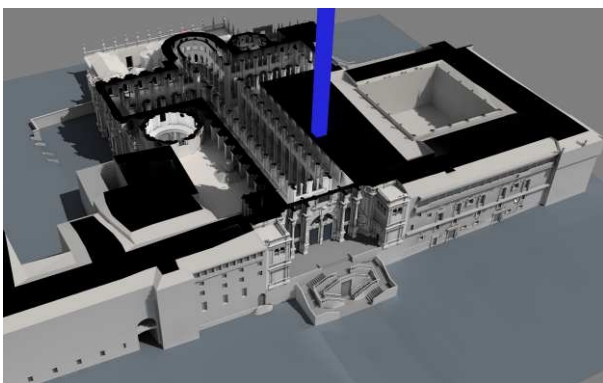


Figura 4. Seccionado horizontal y eje interactivo.

El caso de estudio que nos ocupa permite utilizar gestos de un toque y de dos. Los primeros, de un solo toque, calculan una intersección entre un rayo enviado desde la cámara, pasando por la proyección del toque en la escena 3D, hacia el modelo. Si hay intersección, el movimiento del toque origina un movimiento de desplazamiento sobre el plano perpendicular a la normal de la superficie interseccionada. Este movimiento, que no es el habitual

utilizado en estos casos, se diseñó para poder examinar de una forma mucho más adecuada espacios arquitectónicos, y permite un desplazamiento homogéneo por las grandes superficies del edificio examinado, como fachadas.

Para gestionar los dos toques se utiliza un algoritmo propio que denominamos PRotaZoom (*Pitch + Rotation + Zoom*) y que permite combinar distintas transformaciones en todos los ejes basándose en la configuración geométrica de los dos toques y su movimiento.

Cuando se detectan dos toques, se lanza un rayo en el punto medio de dichos toques, y se genera un rayo partiendo de la cámara que pase por ese punto. El punto de intersección del rayo con el modelo es el centro de una semiesfera virtual con radio hasta la cámara. A partir de ese momento, y siguiendo los parámetros mostrados en el gráfico anterior, la rotación y el cabeceo son modificaciones en la primera y segunda coordenada polar sobre la semiesfera, y el zoom simplemente modifica su radio. De esta forma, se consigue un movimiento producto de las tres transformaciones al mismo tiempo. Al soltar los toques, se gestiona durante un tiempo predefinido una cierta inercia, disminuyendo logarítmicamente el vector de movimiento que poseía la cámara, y aumentando la sensación de fluidez de cara al usuario.



## 4. Resultados

Como resultado de este trabajo se obtuvo una aplicación que cumple con los objetivos previstos, y que forma parte de la exposición *Locí Iacobi* en Santiago de Compostela.

El modelo resulta adecuado para el análisis formal del edificio tanto para el usuario profano, tan solo interesado en aspectos generales de la arquitectura de la catedral compostelana, como para el especialista o estudioso de la misma, por el rigor métrico y formal al que responde esta maqueta virtual.

Asimismo, este modelo digital constituye una fuente más de documentación métrica del edificio compostelano, realizado y utilizable en el entorno de trabajo CAD usado habitualmente en las tareas de elaboración de documentación planimétrica arquitectónica.

## 5. Conclusiones

El uso de la radiosidad por refinamiento progresivo, combinada con un modelo altamente detallado, permiten la obtención de modelos eficientes capaces de ser mostrados en tiempo real con características de iluminación realista incluso en modelos arquitectónicos de la complejidad de una catedral. La aplicación de criterios de interacción natural en una aplicación que utilice tales modelos permite de manera cómoda y fluida el análisis formal del edificio patrimonial.



## Agradecimientos

Los autores desean manifestar su agradecimiento a la *Secretaría Xeral para o Turismo* de la *Consellería de Cultura e Turismo* de la Xunta de Galicia, cuya iniciativa y soporte ha hecho posible la realización de este trabajo.

## Bibliografía

- CONANT, KENNETH, J. (1983): “*Arquitectura románica da Catedral de Santiago de Compostela*” Ed. Colexio Oficial de Arquitectos de Galicia. Vigo.
- FRANCO TABOADA, J.A, y TARRIO CARRODEGUAS, S. (1999): “*As Catedrais de Galicia. Descripción Gráfica*”. Departamento de Representación e Teoría Arquitectónicas. Ed. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela.
- ILUX (2010): “*Catedral, Libro de Piedra*” Ilux Visual Technologies. [on-line] [Consulta 15-04-2011] <http://www.ilux.es/es/catedral>
- MARTIN, S. & EINARSSON, P. (2010): “*Real Time Radiosity Architecture*” Presentación en el curso “*Advances in Real-Time Rendering*” en SIGGRAPH 2010 [online] [Consulta 15-04-2011]  
<http://publications.dice.se/attachments/Siggraph10-ARR-RealtimeRadiosityArchitecture.ppt>
- MARTZ, P. et al. (2007): “*OpenSceneGraph Reference Manual v2.2*”, Ed. Kuehne. B. and Markt. P [online] [Consulta 15-04-2011]  
[http://www.osgbooks.com/books/osg\\_refman22.html](http://www.osgbooks.com/books/osg_refman22.html)
- TAÍN GUZMÁN, M. (1999): “*Trazas, Planos y Proyectos del Archivo de la Catedral de Santiago*”, Ed. Diputación Provincial de A Coruña.